Universidad Carlos III de Madrid

Dimensionado del Accionamiento de un Cabestrante Mediante Herramientas Informáticas

Trabajo de Fin de Grado

Félix J. Cruzado García

Tutor: Juan Carlos Burgos Díaz

Grado en Ingeniería Eléctrica

Curso 2019-2020

Leganés

Agradecimientos

Me gustaría darle las gracias a mi tutor Juan Carlos Burgos Díaz por darme la oportunidad de realizar este TFG y de haberme ayudado tanto durante todo el proceso, dedicándome todo el tiempo que necesité para ello.

A mis padres, darles las gracias por estar ahí y por darme siempre lo que he necesitado. A mi familia, a los que están, y a los que se han marchado pero que todavía viven en mi corazón, se lo dedico.

Para Duque, Patricia, Irene y Lidia, que me acompañan en los momentos más difíciles, en los más alegres, y que siempre están apoyándome, gracias por todo.

Y a Javier, Álvaro, Fernando y Andrés, con los que he luchado tanto mano a mano en esta carrera y que ahora tanto quiero, muchas gracias.

Puedes fracasar, pero no puedes rendirte.

Índice

Índice de Figuras

Índice de Figuras

1. Introducción

La digitalización de todos los procesos, hoy en día, facilita las tareas y nos permite resolver problemas de una manera eficiente. Este Trabajo de Fin de Grado servirá como modelo de referencia para resolver problemas de máquinas eléctricas de manera sistematizada, así como el dimensionado en la herramienta informática comercial gratuita SIZER de SIEMENS.

Además, se implementarán unas hojas de cálculo de Excel en las cuales, la introducción de datos iniciales del problema bastará para que la solución de éste se muestre.

El caso que se va a plantear será sobre cabestrantes, un dispositivo mecánico que va enrollando, por ejemplo, un cable, tirando de un objeto situado en el otro extremo. Son habitualmente utilizados en grúas para coches.

Este Trabajo de Fin de Grado explicará, paso a paso, la resolución del problema planteado, así como el uso del programa SIZER.

1.1. Objetivo

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Grado es explicar e informatizar un problema sobre cabestrantes, así como crear un manual de uso para las herramientas informáticas comerciales de dimensionado de instalaciones.

Se creará un Excel para la fácil comprobación de los resultados del ejercicio que se propondrá, que podrá ser utilizado para otros problemas semejantes, explicando todo el desarrollo claramente para ayudar con la resolución y corrección de dichos ejercicios.

1.2. Contexto

Actualmente, en la asignatura de 3er curso del Grado en Ingeniería Eléctrica de Máquinas Eléctricas de Corriente Alterna (MECA), los estudiantes deben realizar un trabajo que consiste, por ejemplo, en el caso de un ascensor o una cinta transportadora, en el que, partiendo de unos datos iniciales de los parámetros físicos, se dimensionará la instalación.

A lo largo de las semanas del curso, según se van adquiriendo conocimientos nuevos de la asignatura, los alumnos han de resolver el problema, contestando a las diferentes preguntas planteadas. Estos ejercicios son un eslabón muy importante de la asignatura, y ayudan a aplicar todos los conocimientos adquiridos sobre máquinas asíncronas.

El presente Trabajo Fin de Grado se enmarca en este contexto, y tiene como objetivo servir de ayuda en la generación del enunciado de los trabajos de la asignatura y en la verificación de las soluciones adoptadas por los estudiantes a un determinado problema.

En los trabajos de la asignatura MECA, los estudiantes deben utilizar, si quiera de forma somera, una herramienta comercial de selección de motores. Ocurre que, el manual de

uso de las herramientas comerciales disponibles es muy poco amigable, además de estar redactado para personal con un grado de especialización relativamente elevado. Por eso, un aspecto importante de este Trabajo Fin de Grado es el elaborar un manual de uso de la herramienta SIZER, antes mencionada.

1.3. Definición del problema a resolver

Siendo un cabestrante una máquina que mueve grandes pesos enrollando cable o cuerda sobre un tambor propio, como por ejemplo hace una grúa de un coche, el problema a resolver será un motor que tira de un peso muerto y lo mueve cierta distancia en un plano inclinado, en este caso se trata de un cabestrante que mueve un vehículo.

El problema es el siguiente:

En una nave industrial de reparación de vehículos, existe una rampa por la cual los automóviles han de ir ascendiendo para acceder a otra zona de la nave. Para ello, se dispone de un cabestrante que está fijo en la nave y que tira de los vehículos para subirlos a la plataforma.

La longitud de la rampa de la nave es de 5,5 m y el ángulo sobre la horizontal durante la subida es de 30°. El peso del mayor vehículo que puede ser transportado por el cabestrante es de 2.000 kg.

Durante el izado del vehículo, la eslinga tira del coche de forma que éste sube a una velocidad de 0,5 m/s.

Para el cálculo del cabestrante se admitirán los siguientes valores del vehículo que se desea remolcar:

- Coeficiente de Rodadura: C_{RR}= 0,02
- Superficie frontal: 2,4 m^2
- Coeficiente drag: C_D = 0,50
- Densidad del aire:1,15 kg/m^3

En nuestro caso, suponemos que el rodillo del cabestrante en el que se enrolla la eslinga tiene 20 cm de diámetro. El motor del cabestrante está unido al rodillo a través de un reductor de velocidad de relación 30:1 con un rendimiento del 86%. El cabestrante está conectado a la red de 230V, 50Hz.

2. Teoría básica

Para comprender la resolución del problema, primero se ha de tener una noción clara del funcionamiento mecánico de todo el proceso.

A continuación, se explicarán diferentes términos que estarán presentes a lo largo del problema.

Lo primero que se explicará son los accionamientos.

a) Accionamientos

Un accionamiento es un dispositivo para controlar o regular el funcionamiento de un motor. La idea es no conectar directamente el motor a la red, ya que ésta suministra una tensión y frecuencia constantes, y lo que interesa es tener una velocidad ajustable, además de evitar sobreintensidades en el arranque.

Si se desea mover una masa, se aplica una fuerza al cuerpo, el cual responderá con otra fuerza contraria, y sólo si la primera fuerza es mayor, se moverá y tendrá el cuerpo velocidad:

$$F_{aplicada} - F_{contraria} = M\frac{dv}{dt} + v\frac{dM}{dt} \qquad (1)$$

Siendo:

$$F_{aplicada} = Fuerza\ aplicada\ sobre\ el\ cuerpo\ para\ que\ se\ mueva$$

$$F_{contraria} = Fuerza\ contraria\ que\ el\ cuerpo\ opone\ al\ movimiento$$

$$M = Masa\ del\ cuerpo$$

$$v = velocidad\ lineal\ del\ cuerpo$$

$$\frac{dv}{dt} = Derivada\ de\ la\ velocidad\ respecto\ del\ tiempo$$

$$\frac{dM}{dt} = Derivada\ de\ la\ masa\ respecto\ del\ tiempo$$

En muchos casos la masa del cuerpo a mover no varía al transcurrir el tiempo, y en este caso, el segundo sumando de la ecuación (1) es nulo.

Si el movimiento fuese rotatorio en vez de lineal:

$$T_{aplicada} - T_{contraria} = J\frac{d\omega}{dt} \qquad (2)$$

Siendo:

$$T_{aplicada} = Par\ aplicado\ sobre\ el\ cuerpo\ para\ que\ gire$$

$$T_{contraria} = Par\ contraria\ que\ el\ cuerpo\ opone\ al\ giro$$

$$J = Momento\ de\ inercia\ en\ el\ eje$$

$$\frac{d\omega}{dt} = Derivada\ de\ la\ velocidad\ angular\ respecto\ del\ tiempo$$

Un accionamiento sería un variador de velocidad o un arrancador. Esto será desarrollado más adelante.

Se explicará a continuación cada uno de los términos mencionados en la ecuación (2): Par, momento de inercia y velocidad angular.

b) Par Motor

El par motor es el momento de fuerza que ejerce el motor sobre el eje de transmisión de potencia. Explicado de una manera más simple, se necesita una transmisión de fuerza para que empiece a moverse de manera progresiva.

Las unidades del par son Newton-metro, y el par se representa con la letra "T".

El motor tiene que partir de su estado de reposo y vencer un determinado término de aceleración y término de rozamiento. Un motor ya en marcha es más sencillo de mantenerse rotando que un motor inicialmente parado.

Siendo el Par Acelerante el par necesario para arrancar el motor completamente parado, el "esfuerzo" aplicado para transmitir movimiento a un cilindro rotativo se compone de dos términos:

- Par Electromecánico: El par aplicado al motor para que esté en movimiento.

- Par de Carga: El par necesario durante todo el proceso para vencer el rozamiento existente en el sistema mecánico. Es la suma del *Par de Rozamiento de la Carga* más el *Par mecánico*.

$$T_{acelerante} = T_{electromecánico} - T_{carga} \qquad (3)$$

A su vez, el proceso de funcionamiento del motor se puede dividir en tres instantes:

- Arranque: En este instante se ha de vencer el par de carga más el par acelerante. Inicialmente, el motor está parado y el rozamiento está constantemente presente. Para llevar el motor a la velocidad deseada es preciso que exista una aceleración, con lo que, al ser el par acelerante positivo, $T_{electromecánico} > T_{carga}$, según la ecuación (3).

- Régimen permanente: En este instante, el motor se encuentra girando a velocidad constante, por lo que lo único que se ha de vencer es el par de carga más el par de rozamiento del motor. La aceleración aquí es 0, y esto implica que el par acelerante de la ecuación (3) es 0. El $T_{electromecánico} = T_{carga}$.

- Frenado: En este instante, se desea parar el movimiento hasta el reposo. Toda la energía del movimiento podrá ser devuelta al sistema, obteniendo un frenado regenerativo, o bien, se disipará en forma de calor mediante una resistencia o directamente al motor. Este momento de deceleración causará que el par acelerante de la ecuación (3) sea negativo. El $T_{electromecánico} < T_{carga}$.

La duración de cada uno de los procesos es diferente, siendo más breve el arranque que el régimen permanente para que así pueda funcionar el motor cierto tiempo.

En la siguiente gráfica se representa el Par que debe desarrollar la máquina eléctrica en los momentos en el arranque, el régimen permanente y frenado.

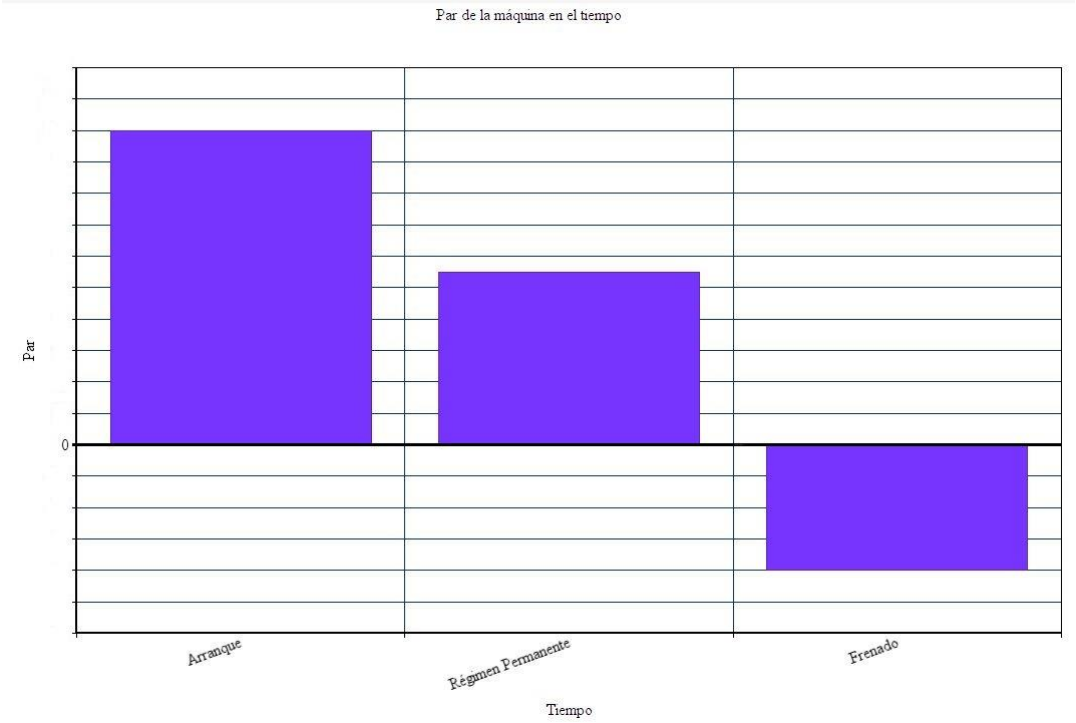


Figura 2.1 Par en el tiempo [1]

Se ha de explicar también la diferencia entre los pares de **carga activos y pasivos**. Las cargas se pueden clasificar en dos tipos:

- Carga mecánica pasiva: Provocan un par opuesto al sentido de giro del motor. Cuando, por ejemplo, se tiene una rueda acoplada a un motor y se desea que la rueda gire de manera horaria, el par que esta carga genera es **opuesto** al sentido de giro de la rueda. Cuando cambia el sentido de giro cambia el sentido del par ofrecido por la carga.

- Carga mecánica activa: El sentido del par de carga que es provocado por estas cargas está determinado de antemano, independientemente del sentido de giro del motor que se desee tener. Las cargas mecánicas activas son aquellas en las que, de una u otra forma, interviene la acción de la gravedad, tales como grúas, ascensores y montacargas, cintas transportadoras que salvan un desnivel, cabestrantes que hacen que una vagoneta ascienda por una rampa, automóviles, carretillas eléctricas, etc.

c) Momento de Inercia

El momento de inercia es una medida de la inercia (propiedad de un cuerpo de permanecer en su estado de reposo o movimiento relativo) rotacional de un cuerpo. Es decir, la tendencia del cuerpo a rotar.

Sus unidades son kilogramo por metro cuadrado, y se representa con la letra "I" y en electricidad con la letra "J", por estar la letra "I" reservada a la intensidad de la corriente. El momento de inercia está estrechamente relacionado con la energía cinética almacenada por el sistema.

Para el caso de un sólido cilíndrico que gira alrededor de su eje de simetría, el momento de inercia equivale:

$$J = \frac{1}{2} \cdot masa \cdot radio^2 \qquad (4)$$

En el caso de que se tenga una carga unida a un motor, el momento de inercia será la suma de los momentos de inercia de ambos.

d) Cajas de engranajes o Reductor de velocidad

Se utilizan para casar las altas velocidades rotatorias a las que gira la máquina eléctrica con las velocidades de giro reducidas que requiere la carga.

Se debe de tener en cuenta el rendimiento y el valor de la relación de transmisión entre el motor y la carga, representado por la letra "i".

Su valor se obtiene analizando un sistema de engranajes donde se asume que tienen ejes de rigidez infinita y con masas despreciables. El punto de contacto entre los dos engranajes tendrá la misma velocidad lineal y con ello se llega a la expresión:

$$i = \frac{\omega_{carga}}{\omega_{motor}} \qquad (5)$$

Siendo:

$$\mathrm{i} = \text{Valor del reductor de velocidad}$$

$$\omega_{\mathrm{motor}} = Velocidad\ angular\ del\ eje\ del\ motor\ (Alta\ velocidad: entrada)$$

$$\omega_{\mathrm{carga}} = Velocidad\ angular\ de\ la\ carga\ (Baja\ velocidad: salida)$$

La potencia saliente de la reductora se obtiene multiplicando la potencia entrante por el rendimiento, y dado que la potencia se obtiene multiplicando el par por la velocidad angular, se tiene:

$$T'_{carga} \cdot \omega_{motor} \cdot \eta = T_{carga} \cdot \omega_{carga}$$

Siendo:

$$T'_{carga} = El\ par\ a\ la\ entrada\ del\ reductor\ de\ velocidad$$

Por tanto, el par de carga visto desde el eje del motor es:

$$T'_{carga} = T_{carga} \cdot \frac{\omega_{carga}}{\omega_{motor} \cdot \eta}$$

$$T'_{carga} = \frac{T_{carga} \cdot i}{\eta} \qquad (6)$$

Una reductora permite que un motor de no muy elevadas dimensiones pueda mover grandes cargas, ya que la reductora reduce la velocidad, pero aumenta el **par**.

Por lo que al momento de inercia se refiere, en el caso de que el motor y su carga estén unidos mediante un reductor de velocidad, se debe referir el momento de inercia de la carga al eje del motor.

Para referir el momento de inercia de la carga al eje del motor se ha de calcular cuál debe ser el momento de inercia de una masa que, girando a la velocidad del motor, almacena una energía cinética igual a la energía cinética almacenada por la carga, esto es:

$$\frac{1}{2} \cdot J_{carga} \cdot \omega_{carga}^2 = \frac{1}{2} \cdot J'_{carga} \cdot \omega_{motor}^2$$

Siendo:

$$J_{carga} = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ carga\ visto\ desde\ su\ propio\ eje$$

$$J'_{carga} = Momento\ de\ inercia\ de\ la\ carga\ visto\ desde\ el\ eje\ motor$$

Sin embargo, si el reductor de velocidad tiene un rozamiento, la energía que debe comunicar el motor a su carga para que ésta adquiera una cierta energía cinética es mayor. Por tanto, para calcular el momento de inercia de la carga referido al eje del motor se escribirá:

$$\frac{1}{2} \cdot J_{carga} \cdot \omega_{carga}^2 = \frac{1}{2} \cdot J'_{carga} \cdot \omega_{motor}^2 \cdot \eta$$

De donde:

$$J'_{carga} = \frac{J_{carga}}{\eta} \cdot \left(\frac{\omega_{carga}}{\omega_{motor}}\right)^2$$

$$J_{motor} = \frac{J_{carga} \cdot i^2}{\eta} \tag{7}$$

e) Velocidad y aceleración angular

Al igual que la velocidad y la aceleración lineal, cuando un objeto rota, lo hace con una determinada velocidad, la cual tiene unas unidades de revoluciones por minuto o radianes por segundo, y es representado por la letra "ω".

El cuerpo que rota puede hacerlo con velocidad constante o bien poseer determinada aceleración angular, cuyas unidades son radianes por segundo al cuadrado, y es representado por la letra "α".

Al igual que con los términos lineales, la velocidad y aceleración angular están relacionados:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \tag{8}$$

Siendo:

$$\alpha = \text{Aceleración angular}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = Derivada\ de\ la\ velocidad\ angular\ respecto\ del\ tiempo$$

El accionamiento y todo el problema queda expuesto de la siguiente forma:

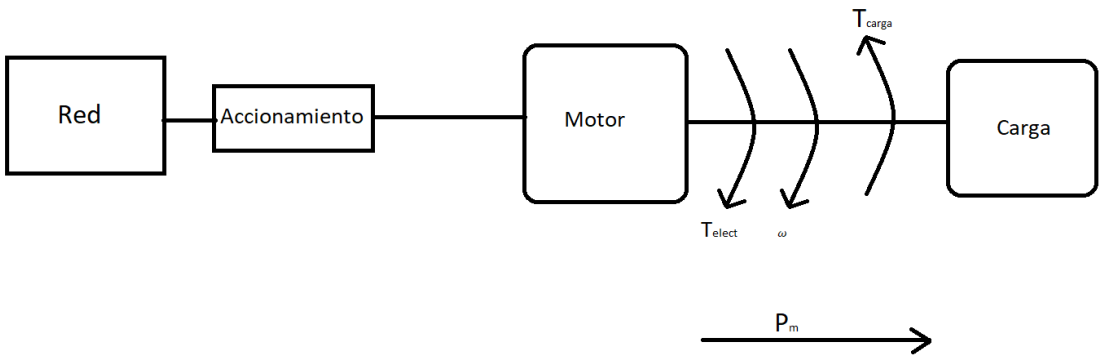


Figura 2.2 Esquema del problema

f) Fuerzas de Resistencias en un vehículo [2]

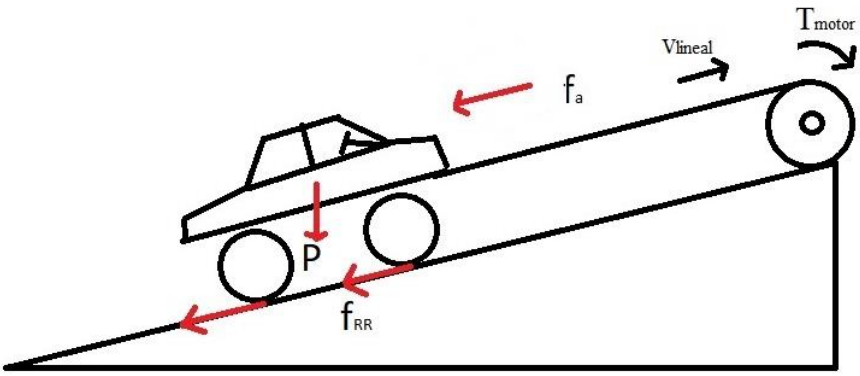


Figura 2.3 Fuerzas de Resistencia en un vehículo ascendente

En un plano inclinado, las fuerzas que se oponen al movimiento de un vehículo se pueden numerar, y son:

- Fuerza de resistencia a la rodadura
- Fuerza de resistencia aerodinámica
- Componente del peso del vehículo en la dirección del movimiento
- Fuerza de resistencia aceleración de masas

Siendo la Fuerza de resistencia total la suma de todas esas fuerzas.

En lo que sigue, se tomarán las fuerzas de la carga positivas cuando vayan hacia abajo, mientras que se tomará la fuerza de tracción de la eslinga del cabestrante como positiva cuando vaya hacia arriba. La velocidad del vehículo se tomará positiva cuando el vehículo suba, y negativa cuando el vehículo baje. Esto es acorde con los signos de la ecuación (1).

i. Fuerza de resistencia a la rodadura

Debido a las imperfecciones del terreno, y asumiendo que las ruedas del vehículo no están bloqueadas, sino que pueden rodar sin problema alguno, la superficie de contacto del neumático con el suelo causa cierta resistencia a su paso.

En Europa se realizan determinadas pruebas a los neumáticos por ley para calcular lo que se denomina coeficiente de rodadura (C_{RR}). Con este tipo de pruebas se conoce el comportamiento del neumático en superficie mojada y su nivel de acústica, lo que debe indicarse en las especificaciones de éste.

El tamaño de la rueda influye sobre este valor, el cual depende de dos factores:

$$C_{RR} = \frac{\mu_r}{R}$$

Siendo:

$$\mu_r = Coeficiente\ de\ resistencia\ a\ la\ rodadura$$

$$R = Radio\ de\ la\ rueda\ del\ vehículo$$

Es por eso por lo que vehículos con grandes ruedas tienen ventaja pues requieren menos esfuerzo para avanzar sobre el asfalto.

La fuerza de resistencia a la rodadura se considera constante hasta llegar a velocidades muy altas, superiores a 200 km/h.

Para calcularla:

$$F_{RR} = m \cdot g \cdot C_{RR} \cdot cos(\beta) \tag{9}$$

Siendo:

$$F_{RR} = Fuerza\ de\ resistencia\ a\ la\ rodadura$$

$$m = Masa\ del\ cuerpo$$

$$g = Aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9{,}8\ m/s^2)$$

$$\beta = Ángulo\ de\ inclinación\ de\ la\ pendiente$$

ii. Fuerza de resistencia aerodinámica

El aire presente frente al vehículo causa cierta resistencia debido a su aerodinámica. En los procesos de fabricación de vehículos se realizan pruebas en túneles de viento donde se puede observar la trayectoria del aire que incide sobre los mismos. Éste es el motivo por el que se fabrican con una forma "redondeada" para así tener mejor aerodinámica.

Con el coeficiente de Drag (C_D) se puede observar a primera vista la aerodinámica del vehículo. Cuanto más alto sea el coeficiente, mayor será su resistencia al aire.

Otro factor a tener en cuenta es el área frontal del vehículo. No presenta la misma resistencia aerodinámica un camión que un vehículo de pequeño tamaño, siendo mayor la fuerza en el caso del camión.

Para calcularla:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot Area\ frontal \tag{10}$$

Siendo:

$$F_a = Fuerza\ de\ resistencia\ aerodinámica$$

$$C_D = Coeficiente\ de\ drag$$

$$\rho_{air} = Densidad\ del\ aire$$

$$v = velocidad\ lineal\ del\ vehículo$$

iii. Componente del peso del vehículo en la dirección del movimiento

De manera cotidiana se puede, incluso, observar que a un vehículo le cuesta más moverse por un plano inclinado que por una superficie a nivel. Es por eso por lo que se debe tener en cuenta la inclinación del plano por el que se mueve. Aquí, el peso del vehículo es lo que causará que aumente o disminuya la resistencia a la subida.

Para calcularla, y siendo β el ángulo de inclinación del suelo:

$$F_G = m \cdot g \cdot sin(\beta) \tag{11}$$

Siendo:

$$F_G = Fuerza\ de\ resistencia\ al\ gradiente$$

$$m = Masa\ del\ cuerpo$$

$$g = Aceleración\ de\ la\ gravedad\ (9{,}8\ m/s^2)$$

$$\beta = Ángulo\ de\ inclinación\ de\ la\ pendiente$$

iv. Fuerza de resistencia aceleración de masas

Esta fuerza de resistencia tiene mucho que ver con el motor del vehículo, sus aceleraciones y frenados. En el presente TFG, no se plantea ningún caso en el que el vehículo se mueva de forma autónoma por la rampa, sino que será tirado por un cabestrante, por lo que esta fuerza no se tendrá en cuenta.

La **fuerza total de resistencia** será, por tanto:

$$F_R = (m \cdot g \cdot C_{RR} \cdot cos(\beta)) + \left(\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot Area\ frontal\right) + (m \cdot g \cdot sin(\beta)) \tag{12}$$

3. Determinación del par del motor

Para resolver este problema, descompondremos el ciclo de trabajo en cuatro apartados:

- Vehículo siendo acelerado en el movimiento de subida
- Vehículo subiendo la rampa a velocidad constante
- Vehículo siendo acelerado en el movimiento de bajada
- Vehículo bajando la rampa a velocidad constante

En cada uno de los apartados se aplicará la ecuación dinámica del sistema, con los signos que correspondan en función del convenio de signos adoptado en cada momento:

$$T_{motor} = \left(\frac{T_{carga}}{\eta \cdot (1/i)}\right) + \alpha \cdot \left(J_{motor} + \frac{J_{carga}}{\eta \cdot (1/i)^2}\right) \qquad (13)$$

Aunque lo lógico sería abordar las diferentes partes del ciclo de trabajo en el orden citado, se va a analizar en primer lugar la subida de la rampa a velocidad constante, ya que es una de las partes más sencillas de analizar.

Una vez resueltas las cuatro partes, se explicará otra parte adicional de manera más cualitativa en cuanto al frenado del vehículo. Por último, se explicará la zona de trabajo del motor.

3.1. Vehículo subiendo la rampa a velocidad constante

El sentido convencionalmente admitido como positivo para la velocidad, la fuerza motriz, la fuerza resistente y el par es el siguiente:

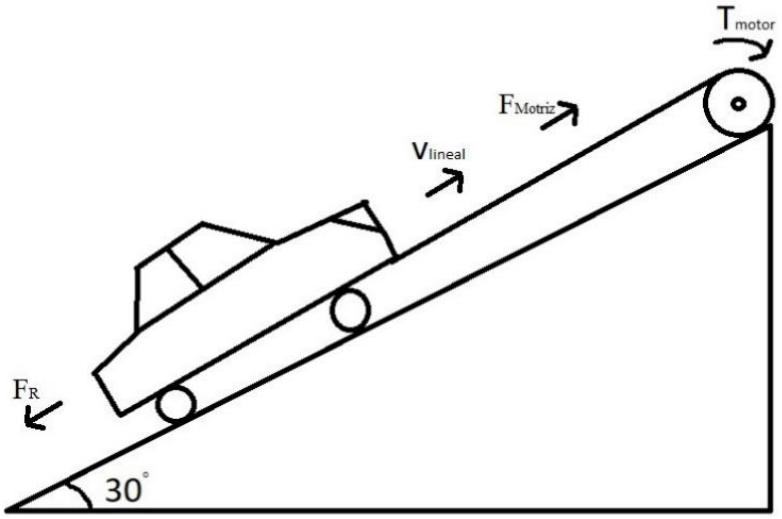


Figura 3.1.1 Sentidos convencionalmente aceptados como positivos para el movimiento de subida

Con ello la ecuación mecánica del vehículo queda:

$$F_{motriz} - \sum F_{resistente} = \sum m \cdot a$$

Con lo cual, la ecuación del movimiento en el eje del motor es:

$$T_{motriz} - \sum T_{resistente} = \sum J \cdot \alpha$$

Las fuerzas del vehículo ascendente se pueden ver en la Figura 2.3.

Al ascender el vehículo con velocidad constante, la aceleración lineal y la angular α serán nulas, quedando toda la ecuación dinámica como:

$$T_{motor} = \left(\frac{\mathrm{T_{carga}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})}\right)$$

a) Par de carga

El término existente en el régimen permanente tendrá en cuenta todas las fuerzas que se oponen al movimiento durante todo el proceso. En este caso, el rozamiento es el que presenta el vehículo con todos los elementos que dificultan su ascensión por la rampa.

El par de la carga se calcula con la fuerza de rozamiento de la ecuación (12), y con el radio del rodillo del cabestrante.

$$T_{carga} = F_R \cdot R_{rodillo} \tag{14}$$

Siendo:

$$F_R = Fuerza\ total\ de\ rozamiento$$

$$R_{rodillo} = Radio\ del\ rodillo\ del\ cabestrante$$

Con las ecuaciones (13) y (14):

$$T_{motor} = \frac{F_R \cdot R_{rodillo}}{\eta \cdot (1/i)} \tag{15}$$

b) Numéricamente

$$T_{motor} = \frac{F_R \cdot R_{rodillo}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})}$$

Con F_R desarrollado (12):

$$F_R = (m \cdot g \cdot C_{RR} \cdot \cos(\beta)) + \left(\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot Area\ frontal\right) + (m \cdot g \cdot \sin(\beta))$$

Sustituyendo los datos del problema:

$$F_R = (2000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}02 \cdot cos(30°)) + (0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}15 \cdot 0{,}5^2 \cdot 2{,}4) + (2000 \cdot 9{,}81 \cdot \sin(30°))$$

$$F_R = 10.150\ N$$

Ya directamente se calcula el par motor con $i = 1/30$:

$$T_{motor} = \frac{10.150\ N \cdot 0{,}1\ m}{0{,}86 \cdot (30)}$$

$$\boxed{T_{motor} = 39{,}34\ Nm}$$

Este es el par que el motor del cabestrante realiza para poder mantener el coche en la rampa mientras lo sube a una velocidad constante de 0,5 m/s desde abajo de la rampa hasta el final, en un recorrido de 5,5m.

La potencia que debe desarrollar el motor en la subida es:

$$P = \frac{F_R \cdot v}{\eta} = \frac{10.150 \cdot 0{,}5}{0{,}86} = 5.901\ W$$

$$\boxed{P = 5.901\ W}$$

Esta potencia se tendrá en cuenta más adelante para la elección del motor que, de manera nominal, pueda suministrar este valor.

3.2. Vehículo siendo acelerado en el movimiento de subida

En este apartado obtendremos el par que se debe aplicar en el arranque si se desea que el vehículo arrastrado tarde 0,5 segundos en alcanzar su máxima velocidad (0,5 m/s) subiendo.

En este caso, la ecuación dinámica del sistema (13) mantiene sus dos sumandos, ya que ahora sí existe una aceleración.

$$T_{motor} = \left(\frac{\mathrm{T_{carga}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})}\right) + \alpha \cdot \left(J_{motor} + \frac{\mathrm{J_{carga}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})^2}\right)$$

El momento de inercia J_{motor} es aquel propio del motor del cabestrante. Es un dato que depende solamente del fabricante. Aunque la potencia del motor todavía no se ha obtenido, y por tanto no es posible conocer de forma exacta el momento de inercia, estimaremos éste en base a la potencia calculada en el apartado precedente (5.901 W), que corresponde a un motor de 7,5 kW. De esta manera el momento de inercia se obtiene en el catálogo del fabricante de motores y resulta ser 0,037 kgm^2.

a) Par acelerante

En la ecuación (13) se puede observar que el sumando de la derecha, el par acelerante, se compone de dos factores.

Como se indicó anteriormente (en la ecuación (2)):

$$T_{acelerante} = J_{Total} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

i. Aceleración angular

Con el tiempo que tarda en alcanzar la máxima velocidad lineal, se hallará la aceleración lineal, pero con el radio de la polea se puede obtener la magnitud angular.

$$a_{lienal} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow a_{lienal} = \frac{v_f - v_o}{t_f - t_0} \qquad (16)$$

Siendo:

$$a_{lienal} = Aceleración\ lineal\ del\ vehículo$$

$$v_f - v_o = Velocidad\ final\ menos\ inicial\ (lienales)$$

$$t_f - t_0 = Tiempo\ final\ menos\ el\ inicial\ (duración)$$

Relacionándola con la aceleración angular:

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha = \frac{a_{lienal}}{R_{rodillo}} \qquad (17)$$

Siendo:

$$\alpha = Aceleración\ angular\ del\ rodillo$$

ii. Momentos de inercia:

El momento de inercia de la carga se calcula de la siguiente manera:

$$J_{carga} = masa\ total \cdot distancia\ al\ eje$$

$$J_{carga} = m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2 \qquad (18)$$

Uniendo las ecuaciones (13) y (18):

$$T_{motor} = \left(\frac{T_{carga}}{\eta \cdot (1/i)}\right) + \left(J_{motor} + \frac{m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2}{\eta \cdot (1/i)^2}\right) \cdot \alpha$$

b) Par de Carga

El par de carga es exactamente idéntico al calculado en el apartado anterior (3.1). A pesar de que la nueva distancia recorrida es menor, los valores del par de carga no cambian.

Si se desea calcular la distancia que el vehículo recorrerá durante el arranque, se realizará de la siguiente manera:

- Velocidad media del coche en aceleración- $\frac{0,5+0}{2} = 0,25\ m/s$
- Tiempo en acelerar- 0,5 s
- Distancia recorrida- $0,25 \cdot 0,5 = \mathbf{0,125\ m}$

c) Numéricamente

$$T_{motor} = \left(\frac{F_R \cdot R_{rodillo}}{\eta \cdot (1/i)}\right) + \alpha \cdot \left(J_{motor} + \frac{m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2}{\eta \cdot (1/i)^2}\right)$$

Vehículo siendo acelerado en el momento de subida

Con:

$$a_{lienal} = \frac{0{,}5 - 0}{0{,}5 - 0} = 1 \ {}^{m}/_{s^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{0{,}1} = 10 \ {}^{rad}/_{s^2}$$

Sustituyendo valores:

$$T_{motor} = \left(\frac{(10.150\ N) \cdot (0{,}1\ m)}{0{,}86 \cdot (30)}\right) + 10\,{}^{rad}/_{s^2} \cdot \left(0{,}037\ kgm^2 + \frac{(2000\ \mathrm{kg}) \cdot (0{,}1\ m)^2}{0{,}86 \cdot (30)^2}\right)$$

$$\boxed{T_{motor} = 39{,}96\ Nm}$$

Este par es un 1% superior al par que se precisa para subir el vehículo a velocidad constante. De aquí deducimos que el arranque del vehículo en la subida no supone unas condiciones muy exigentes para la máquina eléctrica que acciona el cabestrante.

Éste es el par motor que el cabestrante ha de aplicar desde que el vehículo está en reposo al inicio, hasta que alcanza los 0,5 m/s. Es solamente el par necesario para acelerar.

Este valor es muy importante para que el motor tenga el par de arranque correspondiente, ya que podría tener suficiente potencia para actuar de manera nominal, pero no suficiente par de arranque. Es por ello por lo que más adelante se tendrá que evaluar para la selección del motor.

3.3. Vehículo bajando la rampa a velocidad constante

Para analizar el movimiento de bajada cambiaremos el convenio de signos, de forma que se considerarán positivas las velocidades en sentido descendente, las aceleraciones que tiendan a incrementar la velocidad de bajada y las fuerzas motrices que tiendan a hacer descender el vehículo (Figura 3.3.1). Por lo que se refiere a las fuerzas resistentes, se considerarán positivas cuando se opongan a la velocidad del vehículo.

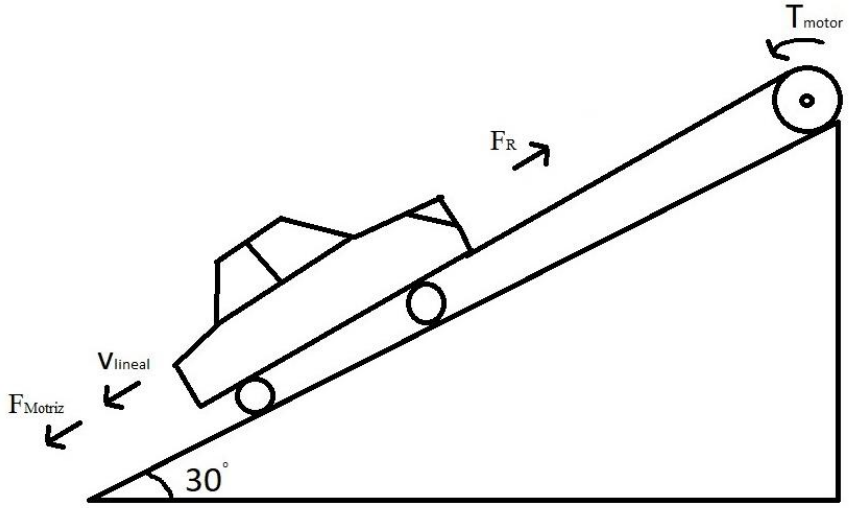


Figura 3.3.1 Sentidos convencionalmente aceptados como positivos para el movimiento de bajada

La ecuación del movimiento del vehículo será:

$$T_{motor} = \left(\frac{T_{carga}}{\eta \cdot (1/i)}\right) + \left(J_{motor} + \frac{m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2}{\eta \cdot (1/i)^2}\right) \cdot \alpha$$

Cualitativamente, las fuerzas que intervienen en el movimiento de bajada son las mismas que intervienen en el movimiento de subida y que han sido estudiadas en el apartado (3.1). Sin embargo, el signo de algunas de las fuerzas cambia.

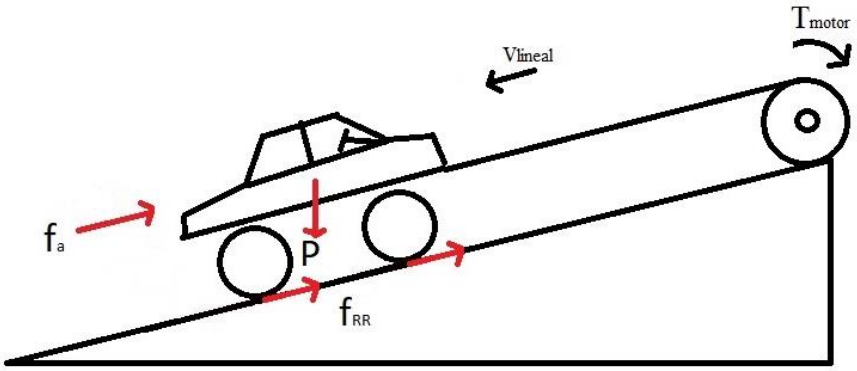


Figura 3.3.2 Fuerzas de Resistencia en un vehículo descendente

Vehículo bajando la rampa a velocidad constante

En esta situación, aunque la rotación de la polea del cabestrante sea en sentido antihorario, el par que tiene que realizar seguirá siendo en sentido horario, al igual que en los apartados anteriores, para así evitar que el vehículo se embale en la bajada.

Las ecuaciones a pesar del sentido de giro del cabestrante seguirán siendo las mismas.

Al igual que en el apartado 3.1, en este instante de movimiento con velocidad constante, no hay término de arranque, por lo que el par motor se obtendrá de la ecuación (13) haciendo $\alpha = 0$:

$$T_{motor} = \left(\frac{\mathrm{T_{carga}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})}\right)$$

Lo diferente en este caso al apartado 3.1 son las fuerzas de resistencias en el vehículo (ecuación (12)).

Las fuerzas que oponen resistencia a que el vehículo caiga libremente pendiente abajo son:

- Fuerza de resistencia a la rodadura: Sigue presente, la rampa es la misma, y las ruedas tienen el mismo contacto con la rampa que antes.

- Fuerza de resistencia aerodinámica: Sigue presente, solo que ahora hacia el lado contrario, oponiéndose al movimiento.

La fuerza que favorece que el vehículo caiga libremente pendiente abajo es:

- Componente del peso del vehículo en la dirección del movimiento: Es en este término en el cual la situación cambia respecto a los apartados anteriores. Ahora la pendiente no está causando que el peso se oponga al movimiento, sino que ahora el peso favorece la bajada por la pendiente.

La nueva Fuerza total de resistencia será:

$$F_R{}' = -(m \cdot g \cdot sin(\beta)) + (m \cdot g \cdot C_{RR} \cdot cos(\beta)) + \left(\frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{air} \cdot v^2 \cdot Area\ frontal\right) \tag{19}$$

Resolviendo numéricamente:

$$F_R{}' = -(2000 \cdot 9{,}81 \cdot \sin(30°)) + (2000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}02 \cdot \cos(30)) + (0{,}5 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}15 \cdot 0{,}5^2 \cdot 2{,}4)$$

$$F_R{}' = -\ 9.470\ N$$

Nótese que el signo de la fuerza es negativo porque el peso del vehículo prevalece sobre la fricción, de forma que la fuerza resultante F_R lleva sentido opuesto al convencionalmente admitido como positivo.

El motor deberá superar el par de carga producido por esta fuerza para que el coche no caiga libremente.

El par que debe desarrollar el motor viene dado por la ecuación (15):

$$T_{motor} = \frac{F_R \cdot \mathrm{R_{rodillo}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})}$$

$$T_{motor} = \frac{-9.470 \cdot 0{,}1\ m}{0{,}86 \cdot (30)}$$

$$\boxed{T_{motor} = -36{,}70\ Nm}$$

Este es el par que ha de aplicar la máquina eléctrica del cabestrante para que el vehículo, que se está moviendo con una velocidad constante de manera descendente, no caiga libremente por la rampa, sino que se mantenga bajando a esa velocidad.

La potencia desarrollada por el motor en estas circunstancias es:

$$P = \frac{F_R \cdot v}{\eta} = \frac{-\ 9.460 \cdot 0{,}5}{0{,}86} = -5.505\ W$$

En valor absoluto:

$$\boxed{P = 5.505\ W}$$

El hecho de que esta potencia sea negativa indica que la máquina se comporta como un generador, convirtiendo la energía potencial del vehículo en el descenso en energía eléctrica.

Esta potencia es menor que la obtenida en el movimiento de subida a velocidad constante. De este modo, como referencia para la selección del motor más adelante, se tomará la potencia anterior en el apartado (3.1).

3.4. Vehículo siendo acelerado en el movimiento de bajada

De la misma manera que en el apartado (3.2), se desea obtener el par que se debe aplicar en el arranque para que el vehículo arrastrado tarde 0,5 segundos en alcanzar su máxima velocidad (0,5 m/s) descendiendo por la rampa.

En este caso, la ecuación dinámica del sistema (13) mantiene sus dos sumandos, ya que ahora sí existe una aceleración.

$$T_{motor} = \left(\frac{\mathrm{T_{carga}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})}\right) + \alpha \cdot \left(J_{motor} + \frac{\mathrm{J_{carga}}}{\eta \cdot (1/\mathrm{i})^2}\right)$$

El momento de inercia J_{motor} es aquel propio del motor del cabestrante. Se seguirá usando el valor indicado anteriormente de 0,037 kgm^2.

a) Par acelerante

Como se indicó anteriormente (en la ecuación (2)), y de la misma manera que en el apartado (3.2):

$$T_{acelerante} = J_{Total} \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

i. Aceleración angular

Como se indicó en la ecuación (17):

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha = \frac{a_{lienal}}{R_{rodillo}}$$

ii. Momentos de inercia

Como se indicó en la ecuación (18):

$$J_{carga} = m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2$$

La ecuación dinámica queda en:

$$T_{motor} = \left(\frac{T_{carga}}{\eta \cdot (1/i)}\right) + \left(J_{motor} + \frac{m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2}{\eta \cdot (1/i)^2}\right) \cdot \alpha$$

b) Par de Carga

El par de carga es exactamente idéntico al calculado en el apartado anterior (3.3).

Si se desea calcular la distancia que el vehículo recorrerá durante el arranque descendente, se realizará de la siguiente manera:

- Velocidad media del coche en aceleración- $(0.5 + 0)/2 = 0{,}25\ m/s$
- Tiempo en acelerar- 0,5 s
- Distancia recorrida- $0{,}25 \cdot 0{,}5 = \mathbf{0{,}125\ m}$

Recorrerá la misma distancia que en el arranque ascendente, pero le supondrá un menor esfuerzo al motor ya que, en este caso, el peso del vehículo contribuye al movimiento.

c) Numéricamente

$$T_{motor} = \left(\frac{F_R \cdot R_{rodillo}}{\eta \cdot (1/i)}\right) + \alpha \cdot \left(J_{motor} + \frac{m_{total} \cdot {R_{rodillo}}^2}{\eta \cdot (1/i)^2}\right)$$

Con:

$$a_{lienal} = \frac{0{,}5 - 0}{0{,}5 - 0} = 1\ {}^{m}/_{s^2}$$

$$\alpha = \frac{1}{0{,}1} = 10\ {}^{rad}/_{s^2}$$

Sustituyendo valores:

$$T_{motor} = \left(\frac{(-9460\ N) \cdot (0{,}1\ m)}{0{,}86 \cdot (30)}\right) + 10\,{}^{rad}/_{s^2} \cdot \left(0{,}037\ kgm^2 + \frac{(2000\ \text{kg}) \cdot (0{,}1\ m)^2}{0{,}86 \cdot (30)^2}\right)$$

$$\boxed{T_{motor} = -36{,}07\ Nm}$$

Éste es el par que el cabestrante ha de aplicar desde que el vehículo está en reposo en la parte superior de la rampa, hasta que alcanza los 0,5 m/s. Es el par necesario para permitir la aceleración. Del mismo modo, este par es menor que en la subida por lo que, para analizar el par de arranque, se usará el del apartado 3.2. Además, este par es un 91% del par que se precisa para subir el vehículo a velocidad constante.

3.5. Frenado del vehículo

En el presente apartado, se describirán cualitativamente los regímenes de frenado para justificar la necesidad o no de utilizar un convertidor de frecuencia para alimentar el motor.

Cuando el vehículo está ascendiendo por la rampa, para que frene por completo, es tan sencillo como que el cabestrante deje de tirar. El vehículo frenará por su propio peso cuando no exista una fuerza de tiro.

Cuando el vehículo está descendiendo por la rampa, tiende a embalarse. El cabestrante deberá de tirar más fuerte de lo que lo estaba haciendo al bajar para que disminuya la velocidad hasta que esta sea nula.

3.5.1. Cuadrantes de Funcionamiento

Para comprenderlo de una manera más gráfica, se explicarán los cuadrantes de funcionamiento de un motor y el punto de trabajo de éste en las diferentes maniobras.

El orden en el que se explicarán los cuadrantes será primero-motor, cuarto-generador y, por último, segundo-freno.

a) Primer Cuadrante de Funcionamiento

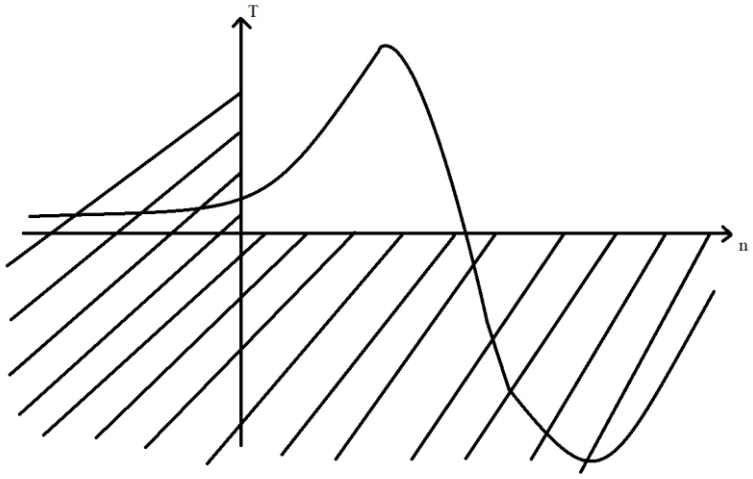


Figura 3.4.1 Primer Cuadrante

Siendo n la velocidad angular en r.p.m.

El sentido de la velocidad de giro del rotor es el mismo que el sentido del campo magnético generado. Obteniendo:

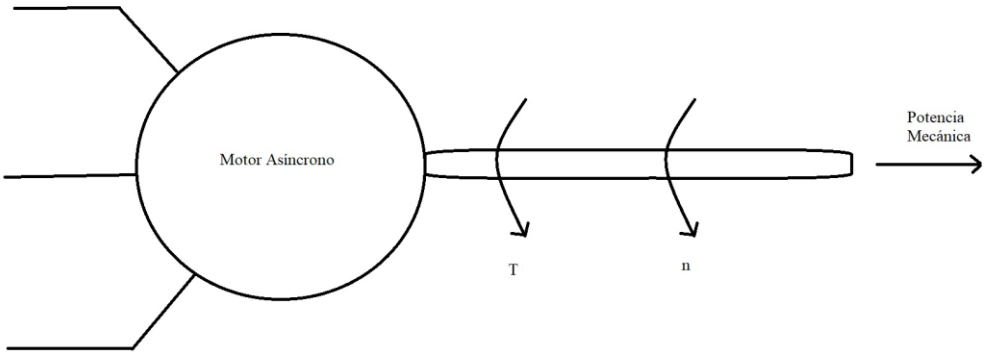


Figura 3.4.2 Potencia del motor en el primer cuadrante

Al ir el par y la velocidad de giro en el mismo sentido, la potencia mecánica del motor:

$$P_{mecánica} = T \cdot n > 0$$

Se da energía a la carga, el motor consume potencia eléctrica de la red y la transforma en potencia mecánica que entrega a la carga, permitiendo así transmitir movimiento. Es decir, en este cuadrante la máquina funciona como un motor.

En el cabestrante estudiado en el presente TFG, todo instante en el que el vehículo esté siendo elevado por la rampa, el motor estará funcionando en este cuadrante. Consumirá potencia de la red para desarrollar un trabajo y así podrá subir el vehículo por la rampa.

b) Cuarto Cuadrante de Funcionamiento

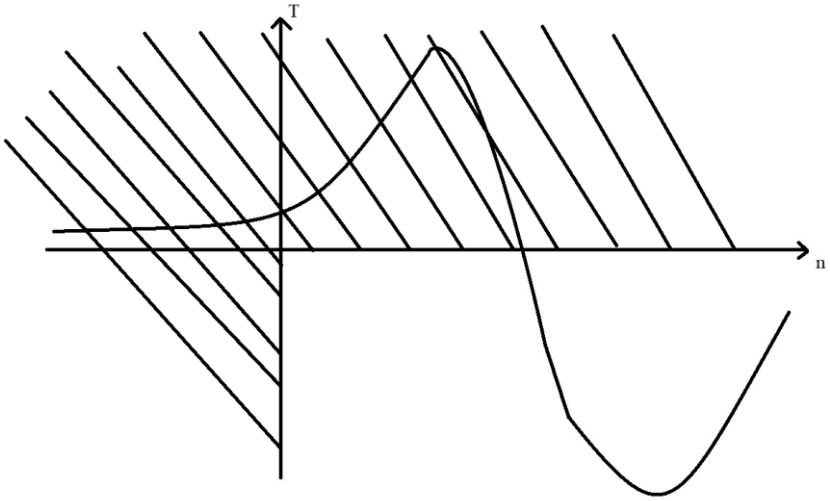


Figura 3.4.3 Cuarto Cuadrante

El sentido de la velocidad de giro del rotor es el mismo que el sentido del campo magnético generado, pero el rotor acaba adelantando al campo, obteniendo:

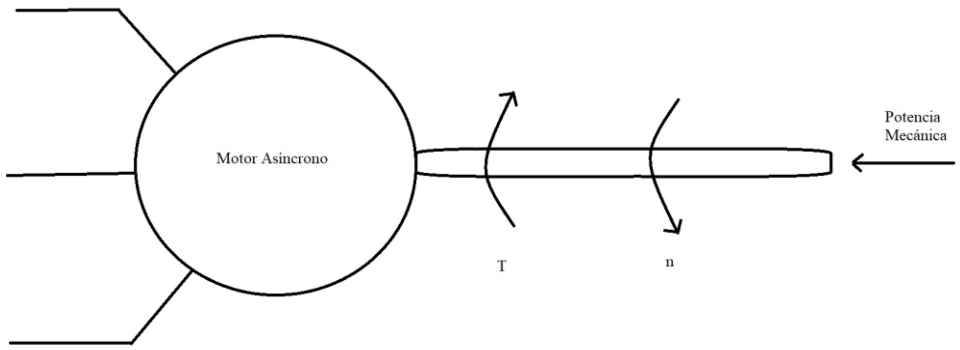


Figura 3.4.4 Potencia del motor en el cuarto cuadrante

El par se opone a la velocidad de giro, y la potencia del motor será negativa:

$$P_{mecánica} = T \cdot n < 0$$

Esto puede ocurrir por dos cosas:

- Porque se acopla una turbina al eje del motor y el par generado por factores exteriores hace que el eje gire y se genera así potencia. No es el caso de este TFG.

- Porque al eje del motor va acoplada una carga que se embala, y éste, para evitarlo, genera un par opuesto al giro, el cual se traduce en generación de potencia para la red.

Sea cual sea la causa, el motor consume potencia del eje y la transforma en potencia eléctrica.

Es decir, en este cuadrante la máquina funciona como un generador.

En el caso del cabestrante, la máquina funciona como generador durante la bajada del vehículo. La máquina genera un par opuesto al giro para que no se embale y así frenar. Esto sería buena implementación del frenado regenerativo, funcionando momentáneamente como generador.

c) Segundo Cuadrante de Funcionamiento

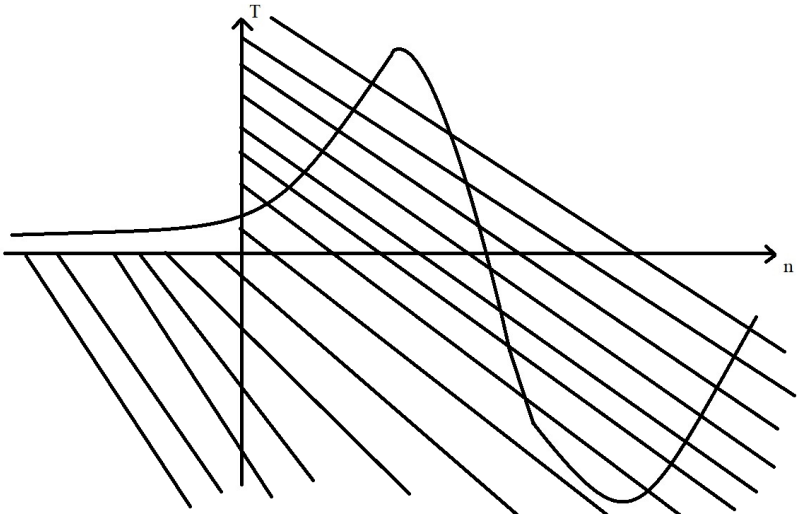


Figura 3.4.5 Segundo Cuadrante

En este cuadrante el rotor de la máquina gira, lo que supone que, de alguna manera, se está aplicando una potencia al eje para que gire. Esta potencia proviene de la carga mecánica acoplada al eje de la máquina (en este caso del coche en descenso).

Al girar el campo magnético en el sentido opuesto al rotor se desarrolla un par de frenado. En esas condiciones toda la energía entregada al eje entrará en la máquina, que la convertirá en potencia eléctrica.

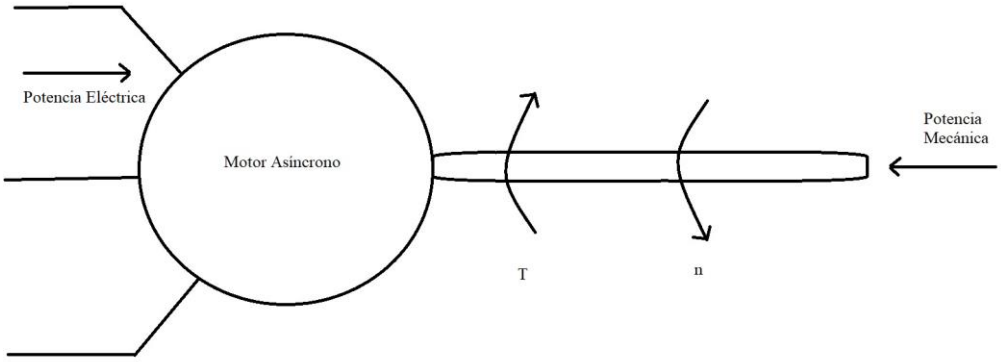


Figura 3.4.6 Potencia del motor en el segundo cuadrante

Es posible demostrar que, en estas condiciones, la máquina consume potencia de la red. Se omitirá la demostración por ser algo muy teórico. La demostración puede encontrarse en el libro “Máquinas eléctricas” [3].

Por lo tanto, en este cuadrante la máquina recibe potencia tanto desde la red como desde el eje. Toda esta potencia es disipada en la máquina en forma de calor mientras disminuye de velocidad. Es decir, en este cuadrante la máquina funciona como un freno.

Todos los cuadrantes funcionan del siguiente modo:

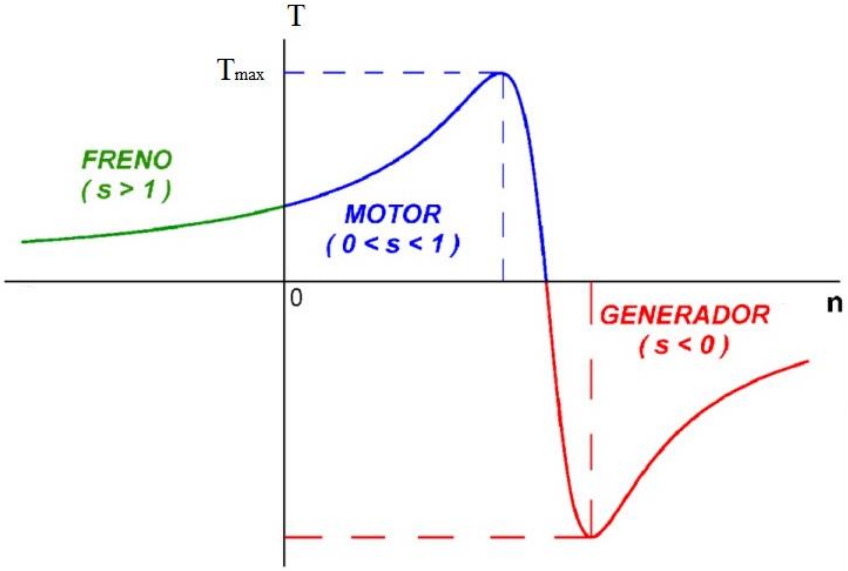


Figura 3.4.7 Cuadrantes de Funcionamiento Desarrollados [4]

El sistema de frenado del segundo cuadrante se denomina Freno a Contracorriente, y este método de frenado está obsoleto ya que la máquina se acaba dañando cuando está expuesta continuamente a tanto calor, además de que consume mucha intensidad. Esta es una de las razones por lo que está justificado el uso de un **convertidor de frecuencia** para la instalación electromecánica del cabestrante que se está estudiando en este TFG. Poder frenar el proceso de manera controlada sin que el motor sufra es uno de los motivos más importantes de la necesidad de usar un convertidor de frecuencia.

Todo lo relacionado con convertidores de frecuencia se explicará más adelante.

3.5.2. Frenado Controlado [5]

Se entiende que una máquina eléctrica funciona como freno cuando ejerce un par de frenado; es decir, de sentido contrario a su velocidad.

Las aplicaciones de accionamientos se pueden dividir en función de la velocidad angular (n) y del par (T) en tres categorías:

A. Aplicación de un cuadrante: La velocidad y el par tienen siempre la misma dirección. Suele ser el caso de bombas y ventiladores, que siempre giran en un único sentido. En este caso la máquina funciona siempre en el cuadrante 1.

B. Aplicaciones en dos cuadrantes:

En este caso caben dos posibilidades.

i. Aplicación sin que cambie el sentido de rotación. Puede cambiar el sentido del par (funcionamiento en los cuadrantes 1 y 4). Son aplicaciones de un solo sentido de giro en las que, durante una parte del ciclo de trabajo, la máquina eléctrica actúa como motor y en otras partes del ciclo de trabajo la máquina eléctrica colabora en la frenada. En una parte del ciclo de trabajo el flujo de potencia va del accionamiento al motor, y en la otra parte en sentido contrario. Este sería, por ejemplo, el caso de un ventilador que se desea decelerar en un tiempo extremadamente breve.

ii. Aplicaciones en las que debe cambiar el sentido de giro, pero la máquina eléctrica no debe colaborar en la frenada. En este caso la máquina siempre funciona como motor en los cuadrantes 1 y 3.

C. Aplicaciones en cuatro cuadrantes: En este tipo de aplicaciones se puede cambiar libremente la dirección de la velocidad y del par. Suele ser el caso de ascensores o de cabestrantes.

En los casos B. i. y C. se precisa poder evacuar la energía que la máquina consume por su eje. Actualmente, los accionamientos modernos constan de varias soluciones para el frenado controlado con variadores de frecuencia.

3.5.3. Los frenados más comunes:

i. Chopper y resistencia de frenado: Se dirige la energía de frenado hacia una resistencia conectada en la etapa de corriente continua del convertidor electrónico a través de un chopper de frenado, un conmutador eléctrico que conecta la tensión de bus de continua a una resistencia que transforma la energía del frenado en calor.

ii. Puente de tiristores o puente IGBT: La idea es el **frenado regenerativo**. Para ello, el puente rectificador debe permitir el flujo de potencia desde la etapa de corriente continua a la etapa de corriente alterna. Por tanto, en este caso, en lugar de un puente rectificador de diodos se deben utilizar unos rectificadores controlados. El puente inversor convierte la corriente continua en alterna cuando se necesita desviar el poder de frenado del motor sobrante a la red de alimentación. Con el puente IGBT se conectan entre si varios generadores y puntos de carga, para poder aprovechar esa energía.

iii. Frenado mediante corriente continua: Consiste en aplicar corriente continua al estator de la máquina para crear un campo magnético estacionario.

El calentamiento de la máquina en este caso no es elevado ya que, a diferencia del frenado a contracorriente, la energía tomada de la red es reducida. No obstante, este tipo de frenado se utiliza poco por su reducida capacidad.

3.5.4. Frenado Regenerativo con el cabestrante

El sistema de frenado regenerativo es ampliamente usado. A modo de ejemplo, es lo que se hace en el metro de Madrid, donde hoy en día no solo se reutiliza la energía para entregársela a otro tren cercano al mismo, sino que ya se puede reutilizar para el funcionamiento de otras instalaciones de la red, tales como escaleras mecánicas, ascensores, etc. En el caso de que no exista ningún consumidor que pueda utilizar esa energía se puede almacenar a través de unos acumuladores.

En el frenado regenerativo hay que conseguir que la velocidad de la máquina sea superior a su velocidad de sincronismo, bien aumentando la primera o bien disminuyendo la segunda. Esto quiere decir que existe un salto del primer al cuarto cuadrante de la siguiente manera:

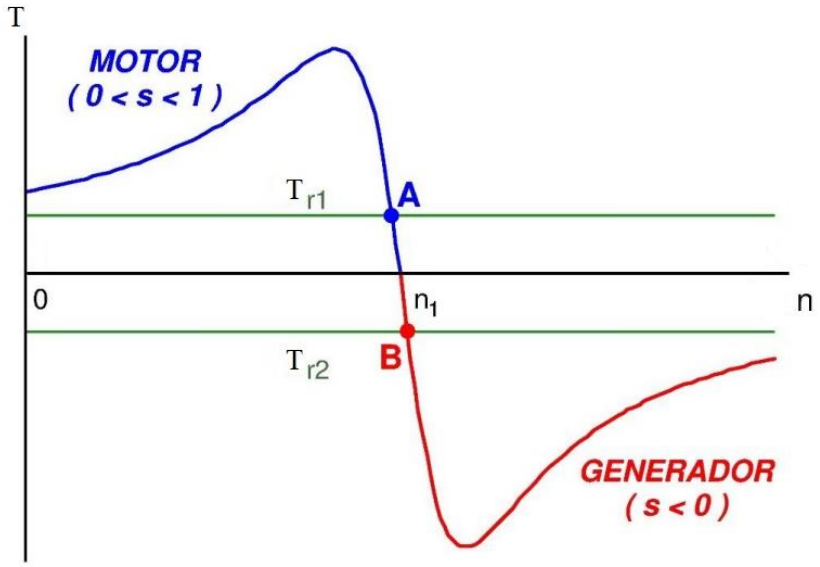


Figura 3.4.8 Frenado Regenerativo [4]

Para el cabestrante, para que pueda mover el vehículo en sentido ascendente, tiene que vencer el par resistente. La máquina da un par y está funcionando como motor, representado por la curva azul, (el par de carga se representa como un par constante, la línea Tr1). La velocidad angular que lleva el motor es ligeramente inferior a la velocidad de sincronismo (Momento de equilibrio representado con el Punto A).

Si ahora se decide bajar vehículos por la rampa con el cabestrante, como se vio anteriormente en el punto (3.)-3.3 (Vehículo bajando la rampa), pero ahora el par de carga es opuesto al anterior. Debido al peso y la acción de la gravedad, el vehículo tiende a embalarse en el descenso de la rampa (representado con la línea Tr2).

Es en este momento cuando la máquina comienza a girar a una velocidad superior a la de sincronismo y así empieza a actuar como freno (generador). El sistema alcanzará el equilibrio cuando el par de la máquina (que es un par de frenado) llegue al Punto B.

De esta manera, el cabestrante retiene el vehículo impidiendo que se embale, con una velocidad final superior a la de sincronismo. La máquina automáticamente funciona como freno regenerativo cuando el sistema se acelera y su velocidad sobrepasa la de sincronismo.

Si la máquina se alimenta mediante un variador de frecuencia, según explicaremos más adelante, se la puede hacer actuar como un generador **sin que aumente su velocidad**. Tan solo habrá que reducir la frecuencia de forma gradual hasta valores que casi provoquen la parada de la máquina.

3.5.5. Numéricamente

En un accionamiento escalar industrial, las consignas son consignas de velocidad. El par que desarrolla la máquina se adapta a la consecución de dicho objetivo. En este sentido, no es necesario calcular el par preciso para frenar el vehículo, puesto que de ello se encarga el accionamiento. No obstante, en lo que sigue, se calculará el par preciso para conseguir una deceleración constante del vehículo hasta su detención total. El motivo de calcular dicho par es tener una idea del orden de magnitud de éste y saber si supone para al accionamiento una sobrecarga considerable o una sobrecarga admisible.

Para hacer algunos de los cálculos que ayudarán a entender la manera a proceder con este tipo de problemas, se analizará primero el frenado en la subida, seguido del de la bajada.

a) Subida

Para detener un vehículo que se encuentra subiendo una rampa, suele ser suficiente con desconectar la alimentación al motor eléctrico y la propia fuerza resistente a la subida tiende a frenar el vehículo (La fuerza usada en 3.1 y 3.2). Esta tiene un valor de:

$$F_R = 10.150\ N$$

Por simplicidad, y debido a su pequeño valor frente a los otros dos sumandos, se ha tomado el componente de la fuerza aerodinámica como constante, cuando en realidad depende de la velocidad del vehículo, que es cada vez menor.

Para un frenado libre, el cabestrante que está subiendo la carga de repente deja de tirar. El vehículo se detiene debido a la fuerza de resistencia mencionada, que evita que siga subiendo. Con la segunda ley de Newton se puede hallar la aceleración de frenado libre:

$$F_R = m_{total} \cdot a_{libre} \rightarrow a_{libre} = \frac{F_R}{m_{total}}$$

$$a_{libre} = \frac{10150}{2000} \rightarrow \boxed{a_{libre} = 5{,}075\ m/s^2}$$

Es decir, que el vehículo tarda en frenar:

$$t = \frac{(0{,}5 - 0)\ m/s}{(5{,}075)\ m/s^2} \rightarrow \boxed{t = 0{,}098\ s}$$

Esto es un tiempo brevísimo, lo que equivaldría a una frenada muy brusca, que no es deseable, pues podría hacer desplazarse a objetos sueltos que hubiera en el interior del vehículo. Por ello se debe incrementar este tiempo de frenado, y disminuir el valor de la aceleración, lo que se consigue mediante un variador de velocidad.

Si se desea una aceleración de frenado de, por ejemplo, $0{,}1\ m/s^2$, la fuerza de frenado que tendrá que realizar el motor para lograrlo se puede obtener haciendo un balance de fuerzas:

$$F_R - F_{freno} = m_{tot} \cdot a$$

$$10150\ N - F_{freno} = 2000\ kg \cdot 0{,}1 \frac{m}{s^2}$$

$$\boxed{F_{freno} = 9950\ N}$$

Esta fuerza, traducida al par visto desde la carga con el radio del rodillo equivale a:

$$T_{carga} = F_{freno} \cdot \mathrm{R_{rodillo}}$$

$$T_{carga} = 9950\ N \cdot 0{,}1\ m \rightarrow \boxed{T_{carga} = 995\ Nm}$$

Y visto desde el eje del motor:

$$T_{motor} = \frac{T_{carga}}{\eta \cdot (1/i)} \rightarrow\ T_{motor} = \frac{995}{0{,}86 \cdot 30} \rightarrow\ \boxed{T_{motor} = 38{,}56\ Nm}$$

Este par está dentro de un orden aceptable, pues es un 98% del par que se precisa para subir el vehículo a velocidad constante.

De esta manera, y con movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, se puede hallar el tiempo que tardará en frenar y la distancia recorrida:

$$t_{frenado} = \frac{\Delta v}{a} \rightarrow\ t_{frenado} = \frac{0{,}5}{0{,}1}\ \rightarrow\ t_{frenado} = 5\ s$$

$$d = v \cdot t_{frenado} - \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(t_{frenado}\right)^2\ \rightarrow d = 0{,}5 \cdot 5 - 0{,}5\ \rightarrow \boxed{d = 1{,}25\ m}$$

b) Bajada

En este caso, la componente del peso del vehículo en el sentido de la rampa lleva la dirección del movimiento, con lo que ayudará a que el vehículo se embale.

Frenado del vehículo

Como se calculó anteriormente para los apartados de bajada (3.3 y 3.4), la fuerza de resistencia tiene un valor de:

$$F_R = -9470\ N$$

El signo negativo indica que el sentido de la fuerza es opuesto al que se estableció como positivo en el convenio de signos en la bajada (Figura 3.3.1). Para conseguir frenar, el cabestrante que está bajando la carga debe aplicar una fuerza de valor superior a la que aplicaba durante el movimiento uniforme de bajada. De esta forma, al ser superior la fuerza del cabestrante, tiende a reducir la velocidad del vehículo. Para obtener el par que debe desarrollar la máquina eléctrica que acciona el cabestrante debemos fijarnos, en primer lugar, en un valor de la aceleración, por ejemplo $0{,}1\ m/s^2$. En este caso, como la velocidad final es nula y la velocidad inicial es hacia abajo, la aceleración va en el sentido de la subida de forma que, con el convenio de signos tomado en la bajada, esta aceleración es negativa ($-0{,}1\ m/s^2$). La fuerza de frenado que tendrá que realizar el motor para lograrlo se puede obtener haciendo un balance de fuerzas:

$$F_{freno} - F_R = m_{tot} \cdot a$$

$$F_{freno} - (-9470\ N) = 2000\ kg \cdot (-0{,}1)\frac{m}{s^2}$$

$$\boxed{F_{freno} = -9470 - 200 = -9670\ N}$$

Esta fuerza traducida al par visto desde la carga, con el radio del rodillo equivale a:

$$T_{carga} = F_{freno} \cdot \mathrm{R_{rodillo}}$$

$$T_{carga} = -9670\ N \cdot 0{,}1\ m \rightarrow \boxed{T_{carga} = -967\ Nm}$$

Y visto desde el eje del motor:

$$T_{motor} = \frac{T_{carga}}{\eta \cdot (1/i)} \rightarrow\ T_{motor} = \frac{-967}{0{,}86 \cdot 30} \rightarrow\ \boxed{T_{motor} = -37{,}48\ Nm}$$

De igual forma, este par está dentro de un orden aceptable, ya que es un 95% del valor del par que se precisa para hacer subir al vehículo a velocidad constante.

De esta manera, y con movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, se puede hallar el tiempo que tardará en frenar y la distancia recorrida, que será el mismo que anteriormente, ya que la aceleración deseada es la misma:

$$t_{frenado} = \frac{\Delta v}{a} \rightarrow\ t_{frenado} = \frac{-0{,}5}{-0{,}1}\ \rightarrow\ t_{frenado} = 5\ s$$

$$d = v \cdot t_{frenado} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(t_{frenado}\right)^2\ \rightarrow d = 0{,}5 \cdot 5 - 0{,}5\ \rightarrow \boxed{d = 1{,}25\ m}$$

3.6. Zona de trabajo del motor e Implantación del Excel

Una vez están todos los pares calculados, es importante comprender los procesos en los que se van a usar. Como se dijo anteriormente, los pares que más importancia tienen según los cálculos son:

- Par del motor del cabestrante con el vehículo subiendo a velocidad constante: 39,34 Nm
- Par del motor del cabestrante con el vehículo siendo acelerado en el movimiento de subida: 39,96 Nm

Todos los motores tienen su curva característica propia que tiene el siguiente aspecto:

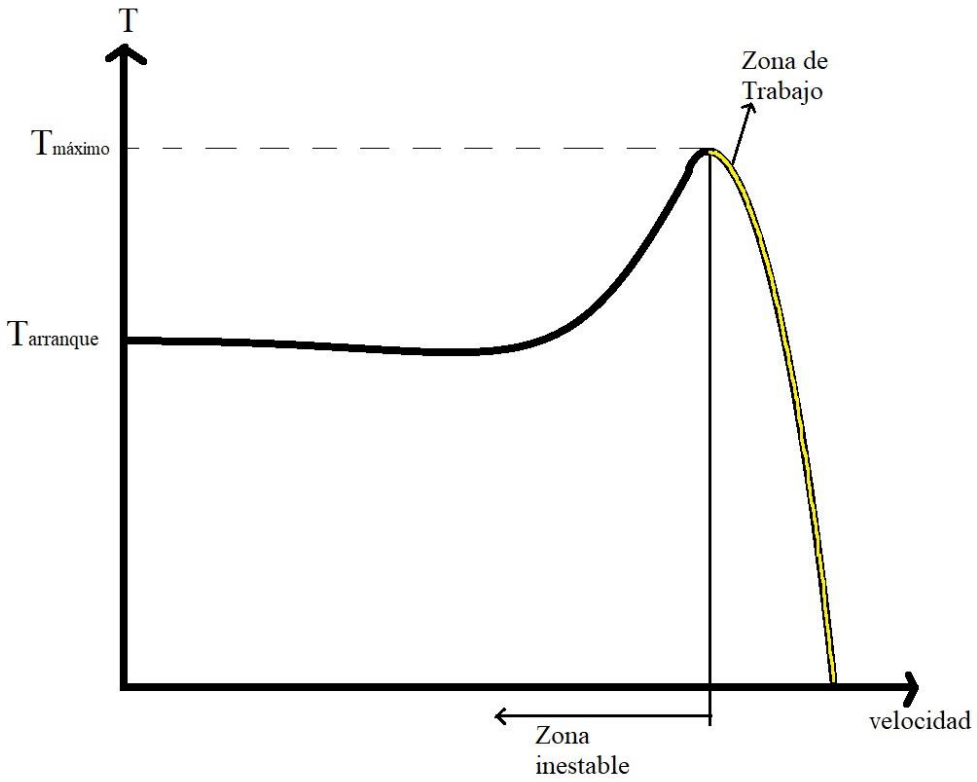


Figura 3.6.1 Curva Característica del motor

La zona estable en la que el motor funciona es la parte que es amarillenta y, en función de la carga y del arranque, se elegirá el motor que acabará operando en esta zona. Este motor debe ser capaz de suministrar la potencia necesaria para funcionar de manera nominal al subir el vehículo por la rampa a velocidad constante.

Teniendo en cuenta que el motor parte del reposo, es necesario que tenga la fuerza suficiente en los arranques para hacerlo en función de la carga. El motor, tiene su propio par nominal (en los catálogos suele ser denominada T_{rated}) y el fabricante proporciona la relación entre este par nominal y el par de arranque. En los catálogos de motores suele venir dado con sus curvas características o de manera tabulada. En el de Siemens, que es

el que vamos a utilizar, viene dado como un valor del cociente entre el par de arranque y el par nominal. Con un simple cálculo sabremos si el motor sirve para la instalación. El valor obtenido debe ser menor que el que aparece en el catálogo. Además, el par de arranque será mayor que el par nominal.

En este TFG se ha creado un libro Excel para la fácil comprobación de los cálculos realizados. Introduciendo los datos iniciales del problema, obtenemos los resultados finales. El libro Excel consta de tres hojas, siendo la primera la introducción de datos del problema, y las otras dos los procesos de subida y de bajada.

Introducir Datos	(ud.)	
Longitud de la rampa	(m)	5,5
Ángulo sobre la horizontal	(°)	30
Masa del vehículo	(kg)	2000
Velocidad lineal del vehículo	(m/s)	0,5
Coeficiente de Rodadura (C_{RR})	-	0,02
Superficie frontal del vehículo	(m^2)	2,4
Coeficiente Drag (C_D)	-	0,5
Densidad del aire	(kg/m^3)	1,15
Radio del rodillo del cabestrante	(m)	0,1
Velocidad de entrada (eje motor)	(rad/s)	30
Velocidad de salida (carga)	(rad/s)	1
Rendimiento Reductora	(p.u.)	0,86
Tiempo en acelerar	(s)	0,5
Momento de inercia del motor	($kg \cdot m^2$)	0,037

g	(m/s^2)	9,81

Figura 3.6.2 Introducción de Datos Excel

Subida (Marcha)	(ud.)	
Componente resistencia a la rodadura	(N)	339,8
Componente rozamiento aerodinámico	(N)	0,1725
Componente del peso del vehículo	(N)	9.810,00
Fuerza de resistencia a la subida	(N)	10.150
Par eje polea (T_{carga})	(N·m)	1.015
Par eje del motor (T_{motor})	(N·m)	39,341
Velocidad subida coche	(m/s)	0,5
Velocidad giro polea	(rad/s)	5,0
Velocidad giro del motor	(rad/s)	150
Velocidad giro del motor	(rpm)	1.432,39
Potencia	(W)	5.901,163
Distancia recorrida	(m)	5,5
Tiempo de subida	(s)	11,0

Arranque (subida)	(ud.)	
Aceleración lineal del vehículo	(m/s^2)	1,0
Aceleración angular del rodillo	(rad/s^2)	10
Aceleración angular en r.p.m	(rpm)	95,49
Momento de inercia eje polea	$kg \cdot m^2$	20
Momento de inercia eje motor	$kg \cdot m^2$	0,0258
Momento de inercia total		0,0628
Fuerza aceleración	(N)	2.000
Fuerza de resistencia a la subida	(N)	10.150,00
Par acelerante en el eje de la polea	(N·m)	200
Par acelerante en el eje del motor	(N·m)	0,628
Sobrecarga durante el arranque	(%)	1,57
Par eje polea (T_{carga})	(N·m)	1.015
Par eje del motor (T_{motor})	(N·m)	39,969
Tiempo arranque	(s)	0,5
Distancia recorrida durante el arranque	(m)	0,1

Frenado libre (subida)	(ud.)	
Fuerza carga en el frenado	(N)	10.150
Aceleración en el frenado	(m/s^2)	5,075
tiempo frenado	(s)	0,10
Frenado controlado (subida)	(ud.)	
Fuerza carga en el frenado	(N)	10.150
Aceleración deseada	(m/s^2)	0,1
Fuerza acelerante	(N)	200,0
Fuerza freno	(N)	9.950,0
Par eje polea (T_{carga})	(N·m)	995,00
Par eje del motor (T_{motor})	(N·m)	38,566
Tiempo fenado	(s)	5,00
Distancia recorrida durante el frenado	(m)	1,250
Funcionamiento máquina asíncrona		Motor

Figura 3.6.3 Subida Excel

Zona de trabajo del motor e Implantación del Excel

Bajada (Marcha)	(ud.)	
Componente fuerza rozamiento	(N)	339,83
Componente razamiento aerodinámico	(N)	0,1725
Componente gravedad	(N)	9.810
Fuerza de resistencia a la subida	(N)	-9.470,0
Par eje polea (T_{carga})	(N·m)	-947
Par eje del motor (T_{motor})	(N·m)	-36,705
Velocidad bajada coche	(m/s)	0,5
Velocidad giro polea	(rad/s)	5,0
Velocidad giro del motor	(rad/s)	150
Velocidad de giro del motor	(rpm)	1.432,39
Potencia	(W)	5.505,813
Distancia recorrida	(m)	5,5
Tiempo de bajada	(s)	11,0

Arranque (subida)	(ud.)	
Aceleración lineal del vehículo	(m/s^2)	1,0
Aceleración angular del rodillo	(rad/s^2)	10
Aceleración angular en r.p.m	(rpm)	95,49
Momento de inercia eje polea	$kg·m^2$	20
Momento de inercia eje motor	$kg·m^2$	0,0258
Momento de inercia total		0,0628
Fuerza aceleración	(N)	2.000
Fuerza de resistencia a la bajada	(N)	-9.470,00
Par acelerante en el eje de la polea	(N·m)	200
Par acelerante en el eje del motor	(N·m)	0,628
Sobrecarga durante el arranque	(%)	91,70
Par eje polea (T_{carga})	(N·m)	-947
Par eje del motor (T_{motor})	(N·m)	-36,077
Tiempo arranque	(s)	0,5
Distancia recorrida durante el arranque	(m)	0,1

Frenado controlado (bajada)	(ud.)	
Fuerza carga en el frenado	(N)	-9.470
Aceleración deseada	(m/s^2)	0,1
Fuerza acelerante	(N)	200,0
Fuerza freno	(N)	-9.670,00
Par eje polea	(N·m)	-967
Par eje del motor	(N·m)	-37,481
Tiempo fenado	(s)	5,00
Distancia recorrida durante el frenado	(m)	1,250
Funcionamiento máquina asíncrona		Generador

Figura3.6.4 Bajada Excel

4. El Motor y los Accionamientos del Cabestrante

Toda la instalación electromecánica funcionará gracias al motor que se haya adquirido y a un correspondiente accionamiento eléctrico (en este caso un convertidor de frecuencia). Los factores que determinarán exactamente el motor que se necesitará son, por ejemplo, la clase de servicio, la potencia y el par necesarios.

Para facilitar su selección, se podrá o bien seleccionarlo de forma manual en el catálogo de motores, o bien a través de un programa para dimensionar la instalación. Este programa nos ayudará a seleccionar tanto el motor como otros elementos de forma automática.

Dentro de los siguientes apartados se explicará todo lo necesario para comprender y calcular los parámetros que ayudarán en la toma de la decisión.

4.1. Clases de Servicio [6]

Un motor no debe nunca sobrepasar la temperatura de servicio especificada por el fabricante ya que, si la supera, puede dañarse. Los regímenes de arranque y frenado (dependiendo de cómo sean), pueden involucrar corrientes (y por tanto calentamientos) muy elevadas. Además, el ciclo de trabajo puede incluir periodos de parada. Por todo ello, la normativa define unas clases de servicio que tienen en cuenta los regímenes antes indicados.

Las clases de servicio se indican mediante los símbolos S1…S9, de acuerdo con IEC 34-1 [7] clases de motores y con VDE 0530 [8].

A los motores se les asignará su clase de servicio en función de la cantidad de tiempo que funcionen de manera continua, los tipos de pausas que puedan tener, si los procesos de arranque o frenado suponen un calentamiento importante del motor y de los tipos de ciclos de trabajo que tengan.

Las tres clases de servicio más simples son S1, S2 y S3, las cuales se explicarán brevemente a continuación.

Las variables que utilizaremos en las gráficas son:

$$P = Potencia\ de\ salida$$

$$N = Funcionamiento\ en\ condiciones\ nominales$$

$$R = En\ reposo, estado\ desconectado$$

a) S1. Servicio en funcionamiento continuo

Funcionamiento a carga constante de duración suficiente para alcanzar el equilibrio térmico en régimen permanente. Es decir, un motor funcionando todo un día completo, sin paros.

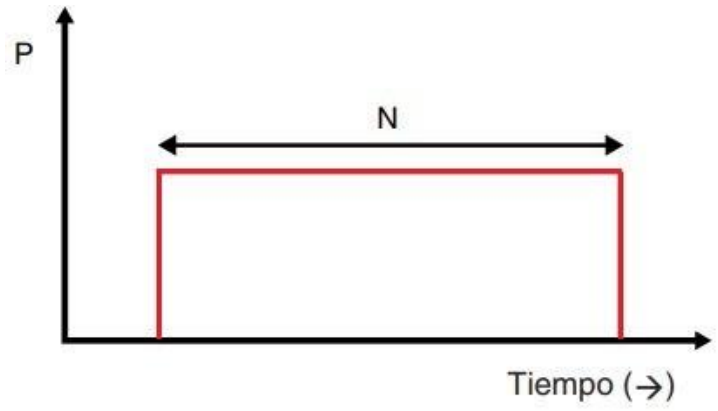


Figura 4.1.1 Servicio S1

b) **S2. Servicio de corta duración**

Operación a carga constante durante un tiempo determinado, menor del requerido para alcanzar el equilibrio térmico, seguido de un tiempo de reposo en estado desconectado de duración suficiente para permitir que la temperatura del motor vuelva a la temperatura ambiente (o del refrigerante).

Son ciclos de carga constantes y breves, con reposos prolongados, lo suficientemente largos como para que se enfríe.

Se debe indicar la duración prevista del ciclo de servicio

Se designará, por ejemplo, S2 30 min.

ABB recomienda los valores 10, 30, 60 y 90 minutos para la duración prevista del ciclo de servicio.

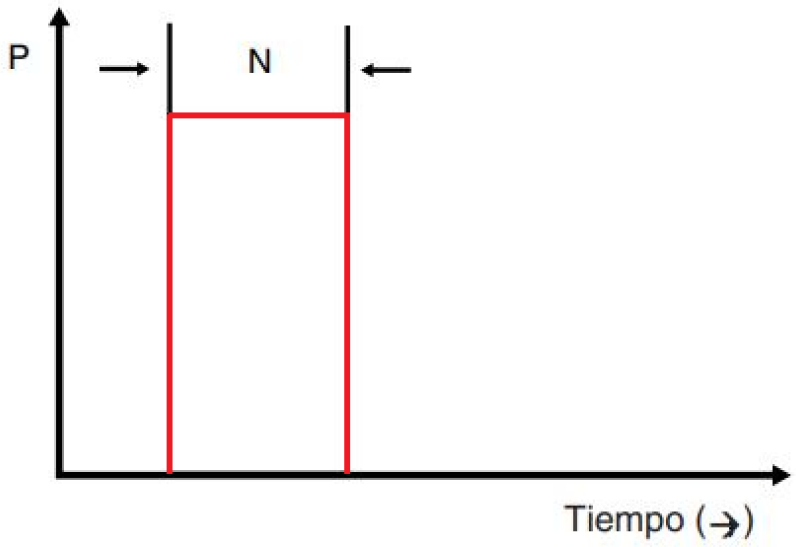


Figura 4.1.2 Servicio S2

c) S3. Servicio Intermitente

Secuencia de ciclos de servicios idénticos. Cada ciclo consta de un periodo de funcionamiento a carga constante y de un periodo de reposo en estado desconectado. El ciclo de servicio es demasiado corto para alcanzar el equilibrio térmico.

El motor no tiene tiempo suficiente para enfriarse entre ciclo y ciclo. La intensidad de arranque no afecta al calentamiento de forma significativa.

Para su designación se utiliza el factor de duración del ciclo:

$$Factor\ duración\ ciclo\ (\%) = \frac{N}{N+R} \cdot 100 \qquad (20)$$

Los valores que recomienda ABB para el factor de duración del ciclo son 15, 25, 40 y 60% y duraciones de un ciclo de servicio de 10 minutos.

Se designará por ejemplo S3 40%

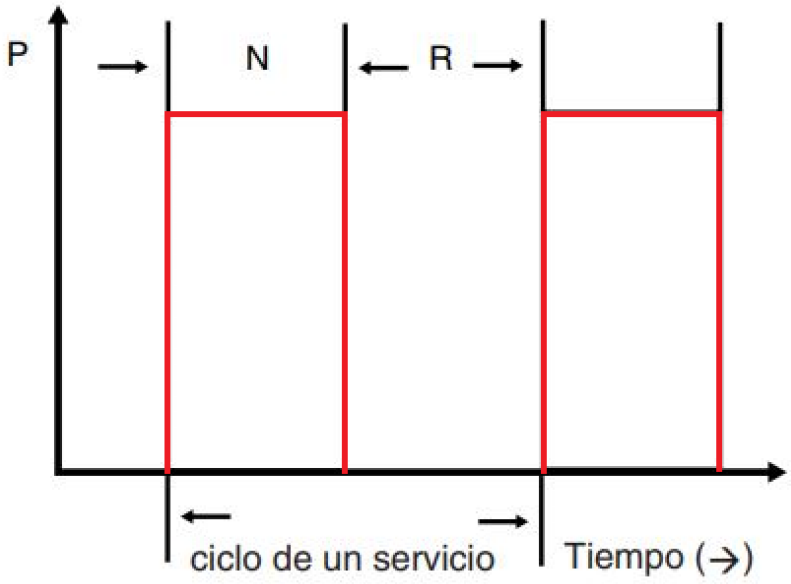


Figura 4.1.3 Servicio S3

Para el cabestrante del ejercicio, siendo su uso para subir los coches por una rampa a otra parte de la nave industrial fuera de la zona de reparación en la que se encuentran, subirá un coche cada cierto tiempo.

El tipo de servicio del motor es **S2** en el que, entre cada uso, el motor se enfría hasta su temperatura ambiente.

4.2. Velocidad nominal del motor

Una vez resueltos y comprendidos los apartados anteriores con relación al par y a las clases de servicio, es importante comprender las velocidades angulares presentes en el sistema. Recordando lo mencionado en el punto (2.)-d), con la reductora de velocidad, existen dos zonas de velocidades:

- $\omega_{motor} \rightarrow$ Velocidad angular del eje del motor
- $\omega_{carga} \rightarrow$ Velocidad angular de la polea del cabestrante.

Siendo ω_{motor} la alta velocidad entrante, y ω_{carga} la baja velocidad saliente.

Ambos elementos, motor y carga, están conectados mediante la reductora. La velocidad que el motor tendrá dependerá solamente del motor, mientras que la velocidad angular de la polea dependerá de la velocidad lineal con la que el vehículo ascienda.

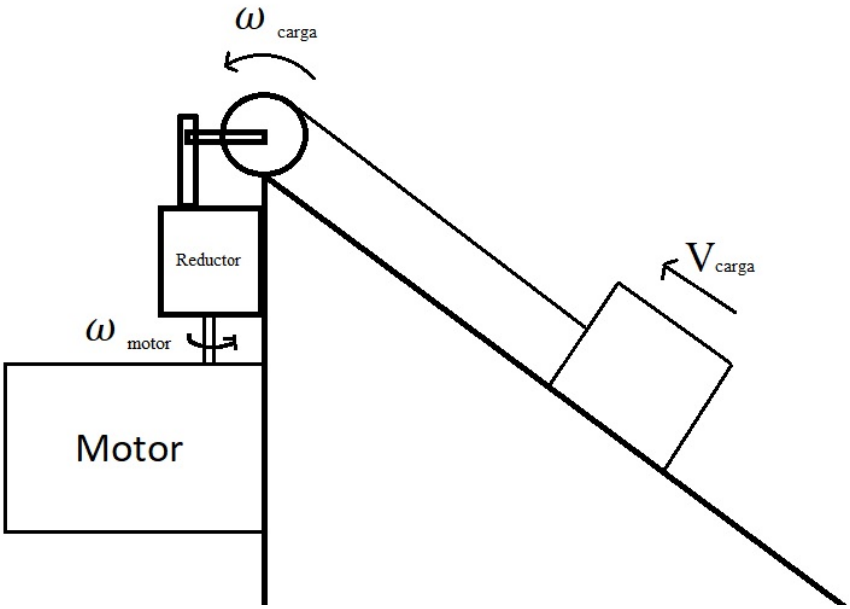


Figura 4.2.1 Velocidades angulares del sistema

a) Velocidad del eje del motor

En motores asíncronos, la velocidad de sincronismo propia del motor siempre será mayor que la velocidad real de giro. Su valor viene dado por:

$$\omega_{motor\ sinc.} = \frac{60 \cdot f}{p} \qquad (21)$$

Siendo:

$$\omega_{motor\ sinc.} = Velocidad\ angular\ de\ sincronismo\ del\ motor$$
$$f = Frecuencia$$
$$p = Pares\ de\ polos$$

Para pasar de la velocidad de sincronismo a la velocidad nominal, se necesitaría otro dato del motor, el deslizamiento (s):

$$s = \frac{\omega_{motor\ sinc.} - \omega_{motor}}{\omega_{motor\ sinc.}} \qquad (22)$$

b) Velocidad de la carga

La velocidad de la carga está directamente relacionada con el radio de la polea del cabestrante, y con la velocidad lineal de la carga:

$$\omega_{carga} = \frac{v_{lineal}}{R} \qquad (23)$$

Siendo:

$$\omega_{carga} = Velocidad\ angular\ de\ la\ carga$$
$$v_{lineal} = velocidad\ lineal\ de\ la\ carga$$
$$R = Radio\ de\ la\ polea$$

Calculando el valor de ω_{carga}, gracias al valor de la reductora y a la ecuación (5), podemos obtener el valor de ω_{motor}.

c) Numéricamente

La velocidad de giro para una velocidad de subida del vehículo de 0,5 m/s:

Datos y ecuaciones (5) y (23):

$v_{lineal} = 0{,}5\ m/s$

$R = 0{,}1\ m$

$i = \frac{1}{30}$

$$\omega_{carga} = \frac{0{,}5}{0{,}1} \rightarrow \omega_{carga} = 5\ rad/s$$

Con la reductora:

$$i = \frac{\omega_{carga}}{\omega_{motor}} \rightarrow \omega_{motor} = \frac{\omega_{carga}}{i} \rightarrow \omega_{motor} = \frac{5}{(1/30)} \rightarrow \boxed{\omega_{motor} = 150\ rad/s}$$

Pasado a rpm:

$$\omega_{motor} = \frac{150\ rad/s}{2 \cdot \pi/60} \rightarrow \boxed{\omega_{motor} = 1432{,}39\ rpm}$$

Por tanto, se debe utilizar un motor de 4 polos (velocidad de sincronismo 1500 rpm).

$$pares\ de\ polos = \frac{60 \cdot f}{n} \rightarrow p = \frac{60 \cdot 50}{1500} \rightarrow p = 2$$

Es decir, 2 pares de polos.

4.3. Uso del catálogo para motores

Para seleccionar el motor necesario en una instalación determinada, se deben de tener los conocimientos necesarios para poder hacerlo de manera manual, sin ningún programa informático.

Para explicar el uso de un manual de motores, vamos a utilizar el catálogo de motores de Siemens- Simotics GP, SD, XP, DP Low Voltage Motors. [9].

En la parte del catálogo D81.1 (05/2018), se muestra un índice para una fácil localización del tipo de motor que se quiera usar:

- Standard Motors
- Standard Motors Next Generation
- VSD Motors for converter operations
- Explosion proof motors
- Application specific motors (marine and smoke extraction)

Para una aplicación que utilizará un variador de velocidad (explicado detalladamente más adelante), como es la instalación del cabestrante, lo lógico sería ir directamente al apartado de **VSD Motors for converter operations**, ya que estos motores están preparados específicamente para ello, poseen una alta eficiencia energética y bajas perdidas de potencia.

Aunque se puede elegir entre todos los numerosos variadores de velocidad ofrecidos en el catálogo de Siemens [10], como por ejemplo los SINAMICS V20, G120C, G120 y G120P, los motores SIMOTICS GP VSD4000 y SD VSD4000 están especialmente diseñados para un uso optimizado con los variadores de velocidad de la familia (G), y no de la familia (V).

Para este TFG vamos a considerar que el variador de velocidad más adaptable a cualquier clase de instalación es el Sinamics G120, un robusto accionamiento estándar para aplicaciones universales en el ámbito industrial, como ya veremos más adelante. Es por eso por lo que será el elegido para la misma.

En el catálogo de motores, incluso, se muestran las diferentes configuraciones posibles con un esquema:

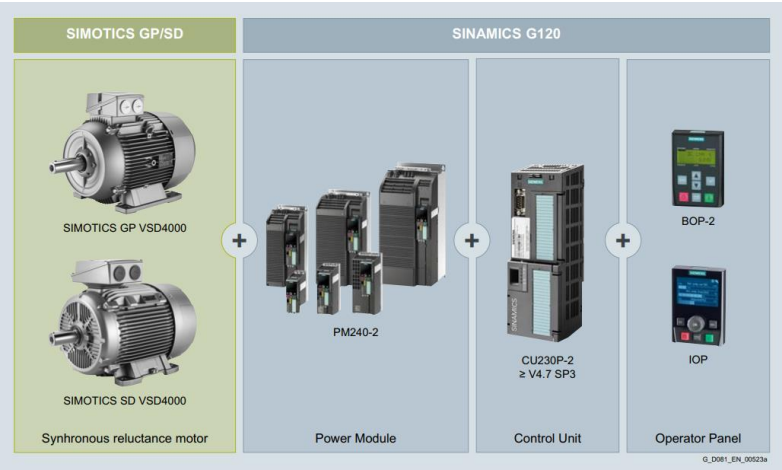


Figura 4.3.1 Motores VSD

Se puede observar que, dentro del apartado VSD Motors for Converter operations, todos los motores GP y SD son o bien de 2 polos o bien de 4 polos. Según los cálculos realizados anteriormente en (4.2), lo que buscamos es un motor de 4 polos. Es por eso por lo que uno de estos motores podría servir.

No obstante, estos motores **son síncronos**, por lo que no interesan para la instalación del cabestrante, ya que tienen un elevado coste. Por el contrario, los motores asíncronos poseen numerosas ventajas como, por ejemplo, su alta eficiencia y la capacidad de generar un par motor constante, su coste bajo, una alta fiabilidad y ausencia de vibraciones. Es por ello por lo que seleccionaremos un motor asíncrono del apartado **Standard Motors** del catálogo de motores**.**

Todos los motores del catálogo cumplen un criterio de seguridad en el que la relación entre el par nominal y el par de actuación tiene un valor entre 0,8 y 3. Además, interesa un motor que tenga eficiencia IE3 (Eficiencia Premium) o superior, para así notar un considerable ahorro con su funcionamiento.

Entonces, entre todas las características, sólo falta saber cuáles de éstas se han de mirar para elegir el motor. El catálogo ofrece una explicación de cada una de las leyendas de éstas referidas a los motores disponibles en las tablas:

Power, frame size, temperature class				Operating values at rated power														Article No., add. data		
Table header – Meaning																				
P_{rated}, 50 Hz	P_{rated}, 60 Hz	P_{rated}, 60 Hz	Frame size	n_{rated}, 50 Hz	T_{rated}, 50 Hz	Different IE class	CC No. CC032A	η_{rated}, 50 Hz, 4/4	η_{rated}, 50 Hz, 3/4	η_{rated}, 50 Hz, 2/4	cos-φ_{rated}, 50 Hz, 4/4	I_{rated}, 50 Hz, 400 V	T_{LR}/T_{rated}	I_{LR}/I_{rated}	T_B/T_{rated}	L_{pfA}, 50 Hz	L_{WA}, 50 Hz	Article No.	m IM B3	J
kW	kW	hp	FS	rpm	Nm			%	%	%		A				dB (A)	dB (A)		kg	kgm²
Rated power at 50 Hz	Rated power at 60 Hz	Rated power at 60 Hz	Frame size	Rated speed at 50 Hz	Rated torque at 50 Hz	Efficiency class according to IEC 60034-30-1	CC No. CC032A	Efficiency at 50 Hz, 4/4-load	Efficiency at 50 Hz, 3/4-load	Efficiency at 50 Hz, 2/4-load	Power factor at 50 Hz, 4/4-load	Rated current at 400 V, 50 Hz	Locked-rotor torque on direct switch-on as a multiple of the rated torque	Locked-rotor current on direct switch-on as a multiple of the rated current	Breakdown torque on direct switch-on as a multiple of the rated torque	Measuring-surface sound pressure level at 50 Hz	Sound power level at 50 Hz	Article number	Weight for type of construction IM B3, approx.	Moment of inertia

Figura 4.3.2 Leyenda de las tablas de motores

Lo importante para seleccionar un motor que sirva a una instalación es que la potencia que pueda desarrollar (Rated Power) sea mayor que la potencia necesaria.

Una vez que conocemos la potencia necesaria, elegiremos un motor del menor tamaño posible (un Frame Size pequeño) para ahorrar espacio en la instalación ya que esto implica reducir costes.

Cálculo de la Potencia nominal

Para diseñar y elegir el motor adecuado, es importante sobredimensionar la instalación para poder tener un rango de seguridad que permita que el motor pueda soportar la carga sin sufrir daños. Normalmente, una vez se instala un motor, se realizan varias pruebas de carga incrementando hasta un 10% (dependiendo del fabricante) más el peso que se supone que es su límite.

Si las fuerzas aplicadas causasen la rotación del cuerpo, la potencia se calcularía de esta manera:

$$P_{nominal} = T_{max} \cdot \omega_{motor}$$

Sin embargo, debido a que el vehículo lleva un movimiento lineal, se usará la expresión de la potencia usada anteriormente en los apartados (3.1 y 3.3).

Tal como se indicó en el apartado (3.3), el valor que se tomará como referente para la selección del motor será la potencia del motor del cabestrante con el vehículo subiendo a velocidad constante: 5,901 kW

Un motor de 6 kW valdría para poder subir los vehículos por la rampa. En la tabla de motores siempre se mirará el motor siguiente con más potencia.

Para un motor de 4 polos de super premium efficiency, en el catálogo- **Standard Motors:**

SIMOTICS GP/SD 1LE1 standard motors
Motors with IE4 Super Premium Efficiency

IE4

Self-ventilated or forced-air cooled motors · Cast-iron series 1LE1504 Basic Line

Selection and ordering data (continued)

P_{rated}, 50 Hz/ P50	P_{rated}, 60 Hz/ P60	Frame size	Operating values at rated power: n_{rated} 50 Hz	T_{rated} 50 Hz	Different IE class 60 Hz/P60	η_{rated} 50 Hz, 4/4	η_{rated} 50 Hz, 3/4	η_{rated} 50 Hz, 2/4	cos-φ_{rated}, 50 Hz, 4/4	I_{rated} 50 Hz, 400 V	T_{LR}/T_{rated} 50 Hz	I_{LR}/I_{rated} 50 Hz	T_B/T_{rated} 50 Hz	L_{pfA}, 50 Hz	L_{WA}, 50 Hz	Cast-iron series 1LE1504 – *Basic Line* Article No.	$m_{IM\ B3}$	J
kW	kW	FS	rpm	Nm		%	%	%		A				dB(A)	dB(A)		kg	kgm²
• Cooling: Self-ventilated (IC 411) or with order code F90 forced-air cooled without external fan and fan cover (IC 418) • Efficiency according to IEC 60034-30: IE4 Super Premium Efficiency, service factor (SF) 1.15 • Insulation: Thermal class 155 (temperature class F), IP55 degree of protection, utilization in accordance with thermal class 130 (temperature class B)																		
4-pole: 1500 rpm at 50 Hz, 1800 rpm at 60 Hz																		
2.2	2.55	100 L	1465	14		89.5	89.6	88.3	0.79	4.5	3.3	8.5	4.7	59	71	1LE1504-1AB4■-■■■■	41	0.014
3	3.45	100 L	1460	20		90.4	91	90.5	0.81	5.9	3.5	8.8	4.2	59	71	1LE1504-1AB5■-■■■■	50	0.016
4	4.55	112 M	1465	26		91.1	91.6	91	0.81	7.8	3.1	8.3	4.3	63	75	1LE1504-1BB2■-■■■■	58	0.020
5.5	6.3	132 S	1470	36		91.9	92.5	92.3	0.83	10.4	2.6	8.3	3.5	56	68	1LE1504-1CB0■-■■■■	77	0.039
7.5	8.6	132 M	1470	49		92.6	93.1	92.7	0.81	14.4	3	7.7	4	56	68	1LE1504-1CB2■-■■■■	80	0.046
11	12.6	160 M	1475	71		93.3	93.5	92.9	0.82	21	2.9	8.1	4.1	63	76	1LE1504-1DB2■-■■■■	127	0.099
15	17.3	160 L	1480	97		93.9	94	93.3	0.8	29	3.7	7.8	4.3	63	76	1LE1504-1DB4■-■■■■	138	0.11
18.5	21.3	180 M	1470	120		94.2	94.7	94.5	0.81	35	2.7	7.9	3.6	59	72	1LE1504-1EB2■-■■■■	187	0.17
22	25.3	180 L	1475	142		94.5	95	94.8	0.81	41.5	2.9	7.7	3.8	59	72	1LE1504-1EB4■-■■■■	192	0.18
30	34.5	200 L	1475	194		94.9	95.2	94.9	0.81	56	3.2	7.3	3.6	60	73	1LE1504-2AB5■-■■■■	258	0.27
37	42.5	225 S	1485	238		95.2	95.5	95.2	0.84	67	3.2	8.4	3.2	69	83	1LE1504-2BB0■-■■■■	345	0.52
45	52	225 M	1485	289	IE3	95.4	95.7	95.4	0.84	81	3.4	8	3.3	69	83	1LE1504-2BB2■-■■■■	415	0.66
55	63	250 M	1486	353		95.7	95.8	95.4	0.86	96	3	8.2	3.3	68	82	1LE1504-2CB2■-■■■■	490	1.1
75	86	280 S	1490	481		96	96.1	95.6	0.85	133	3.4	9.2	3.8	69	83	1LE1504-2DB0■-■■■■	670	1.7
90	104	280 M	1488	578		96.1	96.3	96.1	0.86	157	3.2	9	3.4	70	84	1LE1504-2DB2■-■■■■	730	2.0
110	127	315 M [4]	1491	705		96.3	96.4	95.9	0.86	192	3.2	8.6	3.3	73	87	1LE1504-3AB0■-■■■■	910	2.7
132	152	315 M	1491	845		96.4	96.6	96.2	0.87	225	3.3	8.7	3.3	73	87	1LE1504-3AB2■-■■■■	990	3.1
160	184	315 L	1490	1025		96.6	96.7	96.5	0.86	280	3.6	9	3.2	76	90	1LE1504-3AB4■-■■■■	1180	3.7
200	230	315 L	1490	1282		96.7	96.9	96.6	0.86	345	3.8	9.2	3.4	76	90	1LE1504-3AB5■-■■■■	1300	4.4

Figura 4.3.3 Motor seleccionado para cabestrante

El motor más apropiado para la instalación es uno de 7,5 kW, un 21% más de lo que se necesitaría.

A la derecha del todo se puede ver el número de artículo para poder indicar a Siemens el motor exacto que se desea comprar, en este caso: 1LE1504-1CB2.

Comprobación para el arranque

Es ahora cuando se deberá de comprobar si el motor sirve para el par de arranque en la subida calculado anteriormente de 39,96 Nm.

El valor del par de arranque que tenga el motor ha de ser mayor que el par de arranque obtenido. Mediante el número de relación indicado en el catálogo se podrá comprobar:

$$T_{arranque} / T_{rated} = 3$$

El motor elegido tiene $T_{rated} = 49\ Nm$

Por lo que:

$$T_{arranque} = 147\ Nm$$

El par de arranque que se necesitaba para la subida era de 39,96 Nm, por lo que **este motor sirve para la instalación**.

4.4. Variadores de velocidad

Como se explicó anteriormente, los variadores de velocidad son accionamientos y, en un sistema electromecánico cómo es el de un cabestrante, el motor llevará acoplado uno. Para poder ver cuál es el variador de velocidad más adecuado de usar, se ha de entender qué características tiene cada uno de ellos, así como las funciones que cumplen.

El variador de velocidad es un dispositivo electrónico que permite controlar la velocidad de giro de un motor. Existen numerosos dispositivos mecánicos, hidráulicos o eléctricos que se usan para controlar esta velocidad de giro.

En el caso del convertidor de frecuencia [11], mediante el control de la frecuencia y de la tensión de alimentación suministrada al motor se puede controlar la velocidad de este.

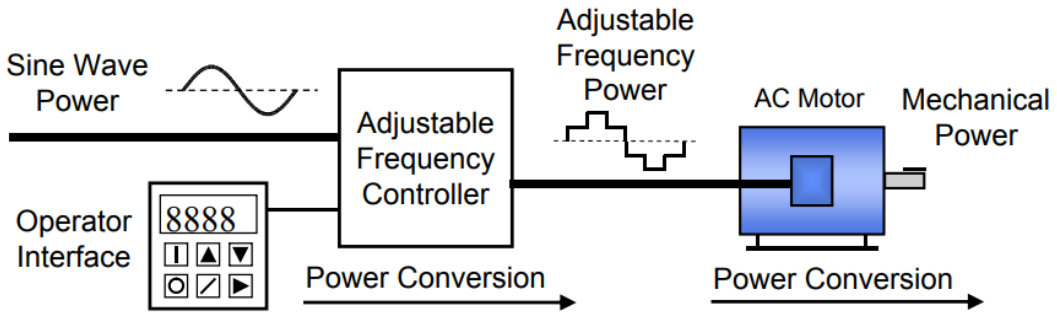


Figura 4.4.1 Diagrama Variador de Frecuencia

Los variadores se usan cuando las necesidades de funcionamiento del motor precisan del control del par y/o de la velocidad. Además, seguirá evitando que el motor empiece a funcionar de manera brusca igual que el arrancador, controlando mediante un tiempo de arranque predeterminado la aceleración con la que irá ascendiendo.

Con este sistema, se puede mantener un par elevado durante todo el arranque, por lo que éste se realiza rápidamente y se reduce la energía disipada en el arranque.

Están integrados con protecciones para proteger tanto el motor como a sí mismos.

Las funciones de un variador de velocidad se pueden resumir en:

- Fácil control de velocidad del motor
- Compensación de la potencia reactiva
- Arranque suave de los motores
- Aumento de la vida útil del motor

Existen dos tipos principales de variadores de velocidad, los llamados variadores escalares, que fundamentalmente persiguen obtener una cierta velocidad en régimen permanente con unas prestaciones moderadamente buenas en régimen transitorio, y los variadores vectoriales, que persiguen tanto obtener una determinada velocidad en régimen permanente como optimizar la respuesta en régimen transitorio (control de posición, control del par durante la aceleración y la deceleración y limitación de la corriente durante el arranque y el frenado).

Figura 4.4.2 Variador de Velocidad Siemens V20 [12]

Las ventajas del uso de un accionamiento como un variador de velocidad son:

- Menor sobreintensidad en el arranque
- Posibilidad de ahorro de energía
- Control del factor de potencia (y de la inyección de armónicos en el suministro)
- Menores esfuerzos mecánicos para el motor (menos calentamiento)
- Control rápido, continuo y a distancia del sistema
- Posibilidad de fijar, variar y mantener la velocidad
- Posibilidad de programar ciclos de trabajo
- Arrancar y parar con suavidad
- Controlar aceleraciones

En el caso del cabestrante, además de controlar la velocidad con la que el vehículo asciende por la rampa, se debe conseguir un arranque y una parada suave. De todo ello se encarga el variador de velocidad. Por esa razón, se elegirá como variador para este TFG un SINAMICS G120, ya que estos son variadores usados para todo tipo de aplicaciones diversas muy versátiles.

En la página de Siemens se pueden ver todas sus características:

SINAMICS G120
Multifunctional. Combinable. Safety Integrated.

Highlights

- High degree of flexibility and combinability
- Higher-level, standard safety concept
- Wide range of power ratings

Applications

Pumping/ Ventilating/ Compress-ing
Moving
Processing
Positioning

Modular design

Format	Built-in unit (modular) Power Module, Control Unit, commissioning options
Drive concept	AC/AC
Degree of protection	IP20/UL open type
Supply voltage/power kW (hp)	
1AC/3AC 200 ... 240 V	0.55 ... 4 kW (0.75 ... 5 hp), Power Module PM240-2
3AC 200 ... 240 V	5.5 ... 55 kW (7.5 ... 60 hp), Power Module PM240-2
3AC 380 ... 480 V	0.55 ... 250 kW (0.75 ... 400 hp), Power Module PM240-2
3AC 380 ... 480 V	7.5 ... 90 kW (10 ... 125 hp), Power Module PM250
3AC 500 ... 690 V	11 ... 250 kW (10 ... 400 hp bei 600 V), PM240-2
Control unit	Control Unit CU230P-2, CU240E-2, CU240E-2 F, CU250S-2
Energy recovery	In conjunction with PM250 Power Modules
Control modes	V/f (linear, square law, FCC, ECO), vector control with and without encoder (VC, SLVC)
Ambient temperature	−10 °C to 40 °C without derating/to 60 °C with derating
Line filter	With integrated line filter for environments according to EN 61800-3 Category C3/C2 Without integrated line filter for environments according to EN 61800-3 Category C4
Braking chopper	Integrated braking chopper for PM240-2 Power Modules
Safety functions	STO, SS1, SBC, SLS, SDI, SSM
Communication	PROFINET, PROFIBUS DP, EtherNet/IP, USS/Modbus RTU, CANopen, PROFIsafe
TIA Portal connected	Yes
Commissioning tools	BOP-2, IOP-2, G120 Smart Access Module, SINAMICS Startdrive
Controller	SIMATIC ET200, SIMATIC S7-1500, SIMATIC PCS 7
Recommended motors	SIMOTICS GP/SD (standard induction motors, synchronous-reluctance motors aluminum/cast iron)

Figura 4.4.3 Sinamics G120 [13]

El variador de velocidad se compone de un controlador y un Power Module que alimente a los dos dispositivos. Directamente se recomiendan en el catálogo, como se puede observar, los siguientes componentes:

- Controlador SIMATIC ET200
- Power Module PM240-2

5. Manual de uso de Sizer de Siemens

Para facilitar la selección de un motor, del sistema de control y de todos los elementos que se utilizarán en una instalación electromecánica, se utilizará un programa de dimensionado gratuito de Siemens, llamado Sizer. Este programa también permite poder directamente lanzar el pedido a Siemens.

5.1. Instalación

Una vez descargado el programa de forma gratuita desde la página web de Siemens, lo primero que aparece es una ventana de ayuda emergente y el "Project Wizard".

En la ventana de ayuda se ofrece un "guided tour", que consiste en un macro que explica paso a paso cómo usar esta herramienta y crear un nuevo proyecto, además ayuda a resolver las distintas dudas que puedan surgir como, por ejemplo, todas las características de varios sistemas dinámicos (SINAMICS), y cómo usar los diferentes módulos de Sizer.

5.2. Ventana inicial

Al arrancar el programa SIZER aparece la ventana mostrada en la Figura 5.2.1, el Project wizard:

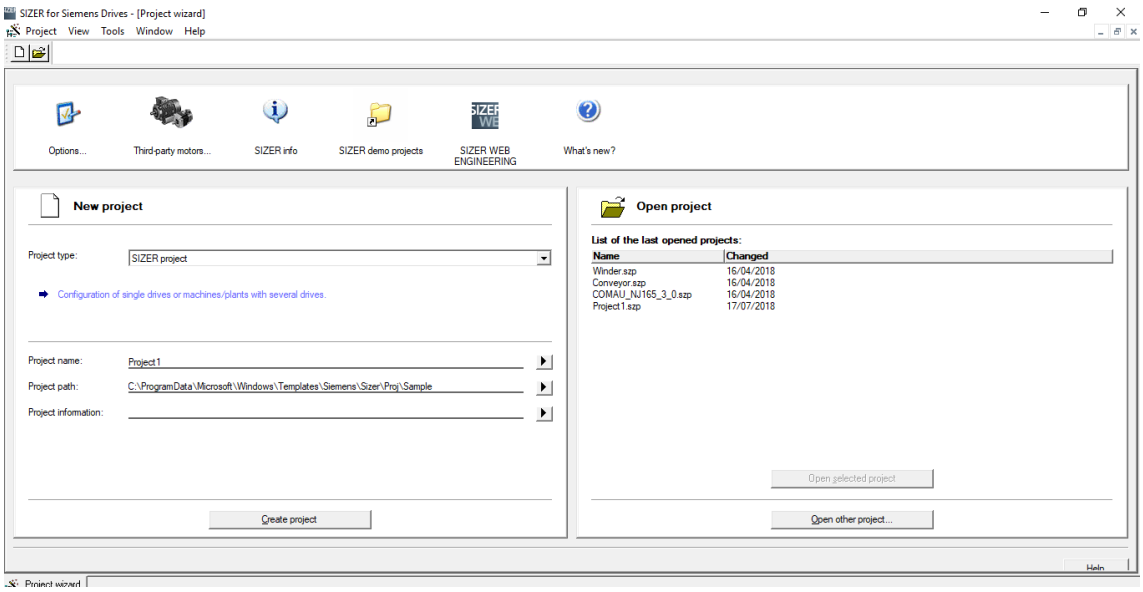


Figura 5.2.1 Ventana de inicio de SIZER

En la parte superior de esta ventana aparece una barra con una serie de iconos:

- **Options**: Este menú dispone de 8 ventanas en las que se pueden indicar parámetros tales como la altitud de la instalación, la temperatura ambiente, la tensión de alimentación (y sus posibles fluctuaciones), la existencia o no de filtros de armónicos en la línea de alimentación, la longitud máxima de los cables de alimentación, el número anual de horas de uso anual del motor (a efecto del cálculo del rendimiento). También da la posibilidad de poner un límite térmico o mecánico para disponer de un margen de seguridad en la utilización del motor eléctrico.

- **Third-party motors**: Permite utilizar en el proyecto motores de fabricantes diferentes de Siemens.
- **Sizer Info**: Versión del programa
- **Sizer demo projects:** Proyectos tipo para iniciación de principiantes
- **Sizer web engineering**: Enlace a la web de ingeniería de Siemens.

La parte inferior de la ventana de inicio (Figura 5.2.1) está dividida en dos columnas, la columna de la izquierda que permite dar de alta un nuevo proyecto en SIZER, asignándole un nombre e indicando en qué carpeta se guardará ("Create Project") y la columna de la derecha, que permite abrir un proyecto existente en la librería ("Open other Project").

5.3. Partes de un proyecto

Para diseñar una instalación electromecánica hay que descomponerla en sus diferentes partes:

- Definir el sistema mecánico
- Elegir el motor y el convertidor electrónico que lo alimenta
- Definir el modo de control del convertidor electrónico (en lazo abierto, en lazo cerrado, etc.)
- Elegir los Componentes adicionales

La ventana que aparece una vez que se ha dado de alta un proyecto proporciona una vista inicial del mismo (Figura 5.3.1).

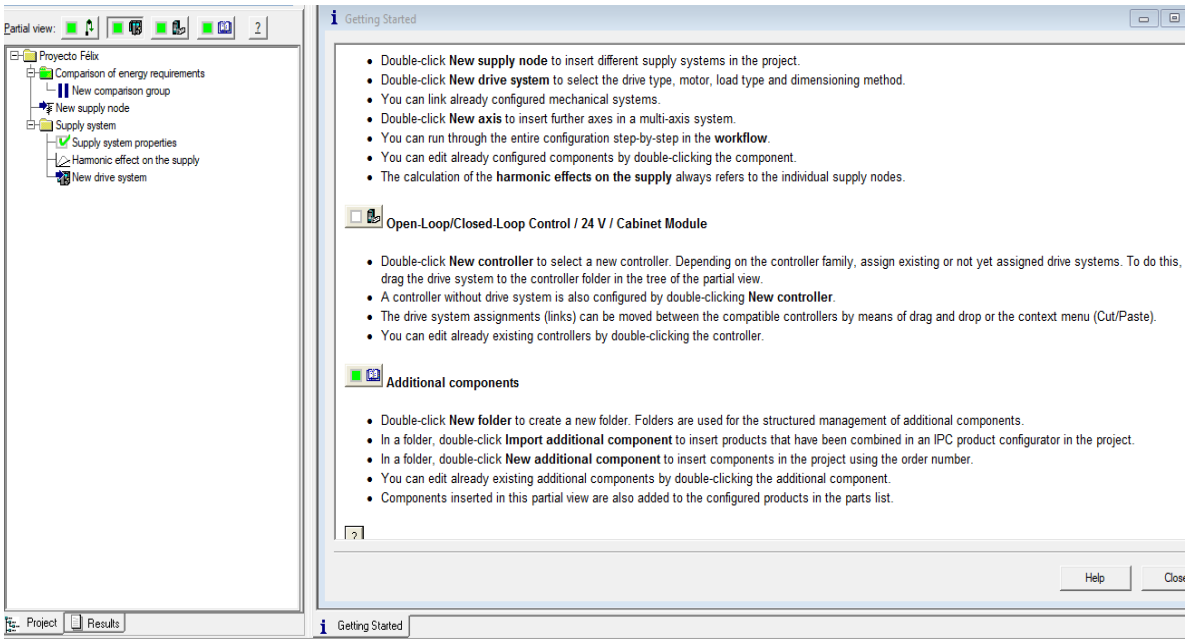


Figura 5.3.1 Vista inicial del proyecto (Getting Started)

En la columna de la derecha de la pantalla "Vista Inicial del Proyecto" (Figura 5.3.1) se proporciona información de los cuatro botones mostrados en la Figura 5.3.3 que serán comentados posteriormente.

En la parte inferior (Figura 5.3.1) de la columna de la izquierda hay dos pestañas: Proyecto y Resultados.

La pestaña Proyecto muestra en forma de árbol los elementos del proyecto. La pestaña Resultados (explicada detalladamente después, en la parte (5.5)- Finalización del Proyecto) muestra dos diferentes módulos nada más iniciar la aplicación. Más tarde se irán añadiendo ramas en función de los elementos que se incorporen a la instalación electromecánica:

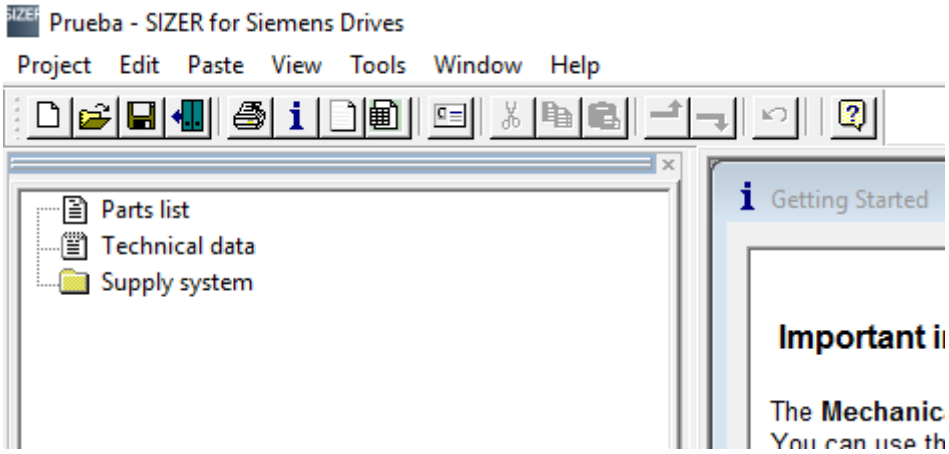


Figura 5.3.2 Pestaña Resultados

- **Parts list:** Muestra de manera ordenada todas las partes de las que se compone el sistema que se está simulando, así como la opción de exportarlo a Excel.
- **Technical data:** Muestra la información del sistema (Tensión, frecuencia, número de fases…)

Cuando se selecciona la pestaña Proyecto, en la parte superior de la columna de la derecha, se muestran cuatro botones (Figura 5.3.3) que llevan a las diferentes partes de la instalación electromecánica.

Figura 5.3.3 Elementos del Sistema

De izquierda a derecha estas son:

Sistema Mecánico, Sistema de Drivers, Sistema de Control, y Componentes Adicionales. En los apartados que siguen se expone cómo definir cada una de las partes de la instalación electromecánica.

5.4. Definición de las diferentes partes de una instalación electromecánica

1) Sistema mecánico

Al seleccionar el sistema mecánico en el menú de la Figura 5.3.3, aparece la ventana mostrada en la Figura 5.4.1.

Un proyecto puede tener varios sistemas mecánicos y éstos se pueden definir fácilmente con la creación de más carpetas ("New folder"), y añadir en ellas un nuevo sistema mecánico.

La definición del sistema mecánico se puede realizar ahora al principio, o más adelante al añadir el sistema de drives (Figura 5.4.11) eligiendo el tipo de carga como sistema mecánico.

Para definir un sistema mecánico al iniciar el proyecto, se debe seleccionar "New mechanical system".

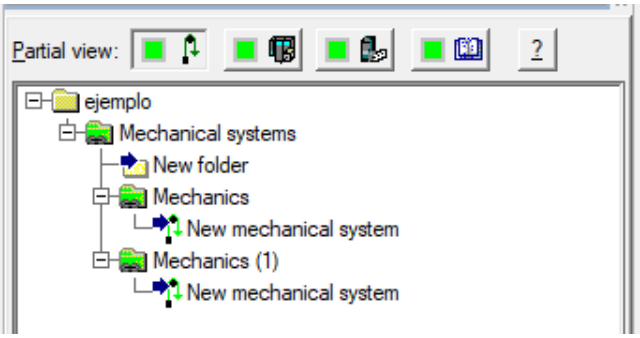


Figura 5.4.1 Sistema Mecánico Nuevo

Al hacer clic en "New mechanical system", emerge una ventana muy intuitiva (Figura 5.4.2), en la cual hay diferentes iconos para decidir qué sistema se usará, además de indicar si se va a utilizar un convertidor electrónico o una conexión directa a la línea de alimentación.

Se puede dar un nombre al sistema y filtrar los resultados.

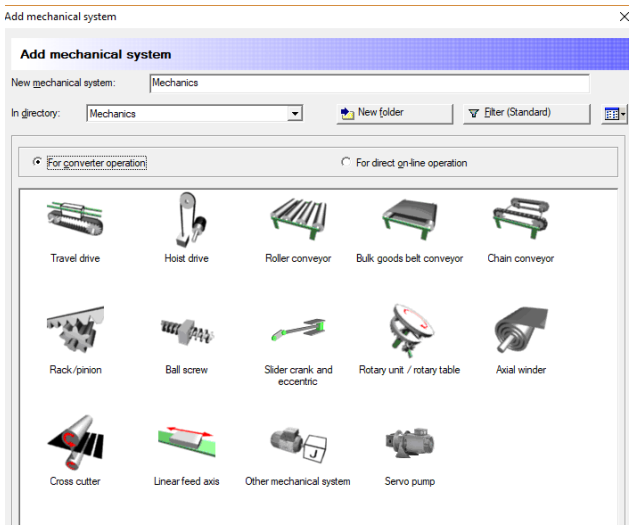


Figura 5.4.2 Tipos de Sistemas

Los 14 iconos de los sistemas mecánicos que aparecen (Figura 5.4.2) son:

- Accionamiento de movimiento lineal con fricción (Travel drive)
- Aparato de elevación (Hoist drive)
- Mesa de rodillos giratorios (Roller conveyor)
- Cinta transportadora (Bulk goods conveyor)
- Cinta transportadora de cadenas (Chain conveyor)
- Accionamiento de movimiento lineal con piñón y cremallera (Rack/pinion)
- Accionamiento de movimiento lineal con husillos (Ball screw)
- Accionamiento de movimiento lineal con biela (Slider crank and eccentric)
- Accionamiento de movimiento angular de masas (Rotary unit/ rotary table)
- Enrollador axial (Axial winder)
- Cortadora rotatoria (Cross cutter)
- Accionamiento de movimiento lineal con motor lineal (Linear feed axis)
- Otros sistemas mecánicos- masas rotatorias y momentos de inercia con movimiento angular especificados con velocidades (Other mechanical systems)
- Bomba Servo (Servo pump)

Dependiendo de la instalación que se quiera desarrollar elegiremos el modelo que más se asimile haciendo clic sobre el sistema mecánico y en “OK”.

A. Definición de las propiedades mecánicas

En la parte del proyecto se observarán todos los nuevos elementos añadidos, pero antes de avanzar más, se han de definir las propiedades mecánicas.

Se hace doble clic sobre el nuevo elemento creado (Figura 5.4.3) y:

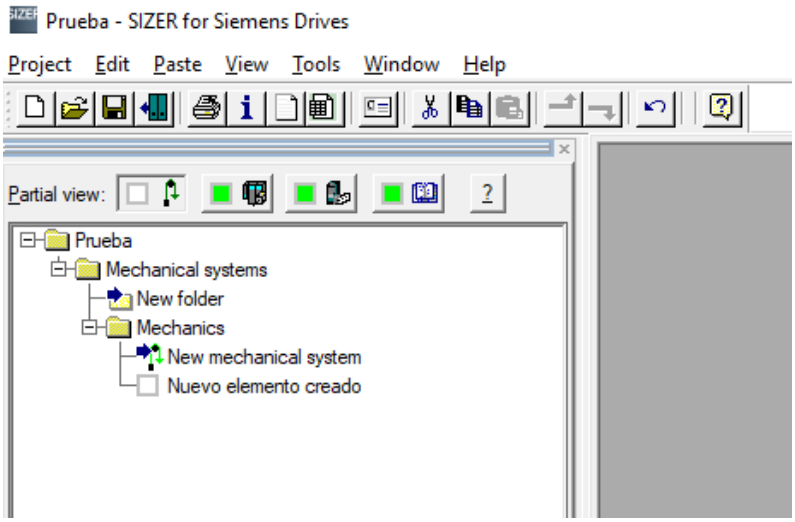


Figura 5.4.3 Ramificación de nuevos elementos

Si por ejemplo es una cinta transportadora, (Roller conveyor):

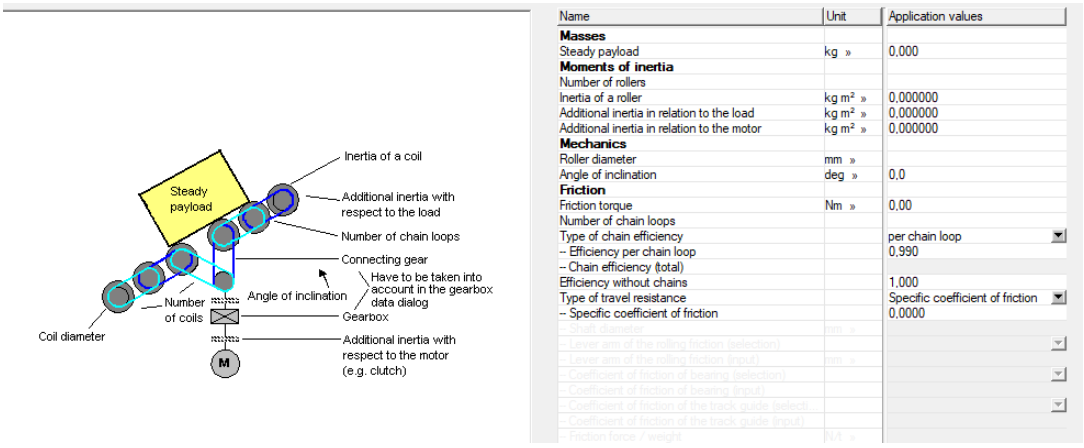


Figura 5.4.4 Sistema Cinta Transportadora

O si es una polea, (Hoist drive):

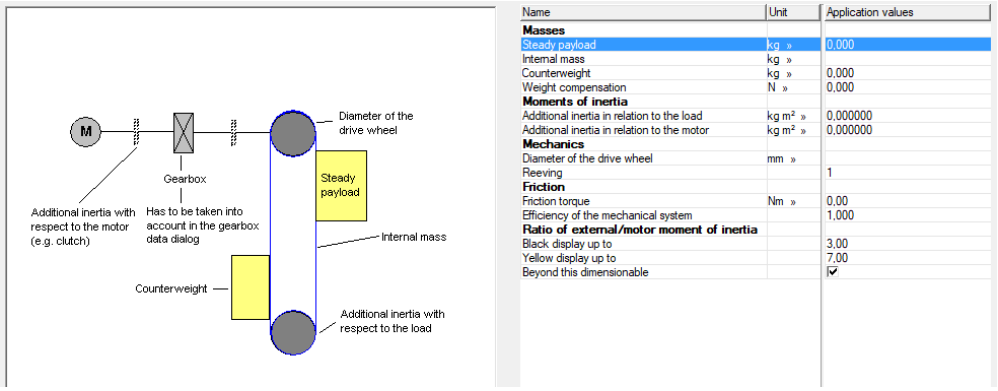


Figura 5.4.5 Sistema de Polea

Se definirían en este caso los datos obligatorios:

- La carga para mover (“Steady payload”)
- La masa del sistema (“Internal mass”)
- Diámetro de la polea (“Diameter of the Drive Wheel”)

Además, se podrían definir todos los demás parámetros si se dispusiese de ellos para hacer el dimensionado más acorde a la realidad (momentos de inercia, par por rozamiento de la polea…).

B. Definición del ciclo de trabajo

Una vez definidos todos los parámetros, se hace clic en “Next” y ahora se ha de definir, en una nueva ventana emergente (Figura 5.4.7), el ciclo de trabajo de todo el proceso, es decir, el recorrido y el comportamiento del sistema, si éste frenase cada cierto tiempo, la velocidad continua que llevaría, el tiempo que tardaría en acelerar y en decelerar, etc.

Todo evento (“Section”) se irá delimitando con trazos, en los cuales se construye una gráfica.

Para definir un ciclo de trabajo simple, en la parte superior de la nueva ventana emergente:

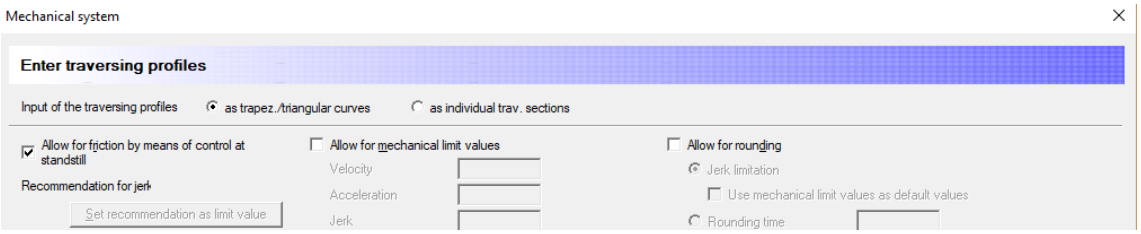


Figura 5.4.6 Parte superior ventana definición del ciclo de trabajo

Hay dos opciones de entrada de los perfiles de desplazamiento ("Input of the traversing profiles"):

- Como curvas trapezoidales o triangulares ("as trapez. /triangular curves")

- Como secciones de desplazamiento independientes ("as individual trav sections")

Dependiendo de los datos conocidos se elegirán las diferentes opciones.

Sea cual sea la elección, se podrá elegir si se desean activar las siguientes opciones:

- Establecer valores límite mecánicos de velocidad, aceleración y fuerza de tiro ("Allow for mechanical limit values")

- Suavizar las esquinas de la gráfica para que los arranques y frenados no sean bruscos y se parezcan más a la realidad ("Allow for rounding")

Dentro de la opción "as trapez. /triangular curves", se pueden definir los procesos como una curva de velocidad trapezoidal.

Los perfiles en "Entries" (Figura 5.4.7) son:

- **Delta**: Intentará llevar la carga de un punto a otro alcanzando la velocidad máxima justo en el medio del proceso (Este perfil no es muy común).

- **Trapezoidal**: Lleva la carga de un punto a otro, comenzando con una aceleración hasta alcanzar la velocidad requerida y manteniéndose en ella hasta que comience a frenar.

- **Trapezoidal (tb=tv=tk):** Igual que el anterior, pero, introduciendo 2 de los datos, el programa calculará el resto de los que hacen falta para el proceso. (Por ejemplo, con espacio y tiempo calcula aceleración y velocidad).

- **p=pause**: El motor no mueve la carga en este proceso.

Para ir definiendo un ciclo de trabajo simple, por ejemplo, se hará un cambio de giro del sentido del motor. Primero acelerará en un sentido hasta alcanzar cierta velocidad y volverá al reposo decelerando y después acelerará en el otro sentido hasta otra velocidad volviendo al reposo decelerando:

Se compondrá de dos partes, Section 1 y 2 y se definen en ambas:

- La entrada ("Entries") como Trapezoidal → s, v, ab, av
- La dirección en la 1 "Forward, up" y en la 2 "Backward, down"
- La distancia que la carga va a recorrer, "Traveling distance"
- La velocidad constante a la que la carga se moverá "Velocity"
- La aceleración de arranque "Acceleration"

- La deceleración de cuando la carga comience a frenar “Decceleration”

Si el proceso tuviese un momento de pausa entre cada ciclo, se añadiría otra Section 3.

En Section 3:

- Entries como p=pause
- Tiempo de la pausa (“Pause time”)

Una vez definido todo, se puede ver en la derecha de la Figura 5.4.7 una gráfica visualizando lo obtenido, en la que se pueden cambiar los ejes de abscisas, se muestra:

- Velocidad, aceleración vs tiempo (por defecto) v-a-t
- Velocidad, distancia vs tiempo v-s-t
- Par de carga, velocidad de giro de la carga vs tiempo M-n-t

Haciendo clic en “Finish” se finaliza la definición de todo el sistema mecánico.

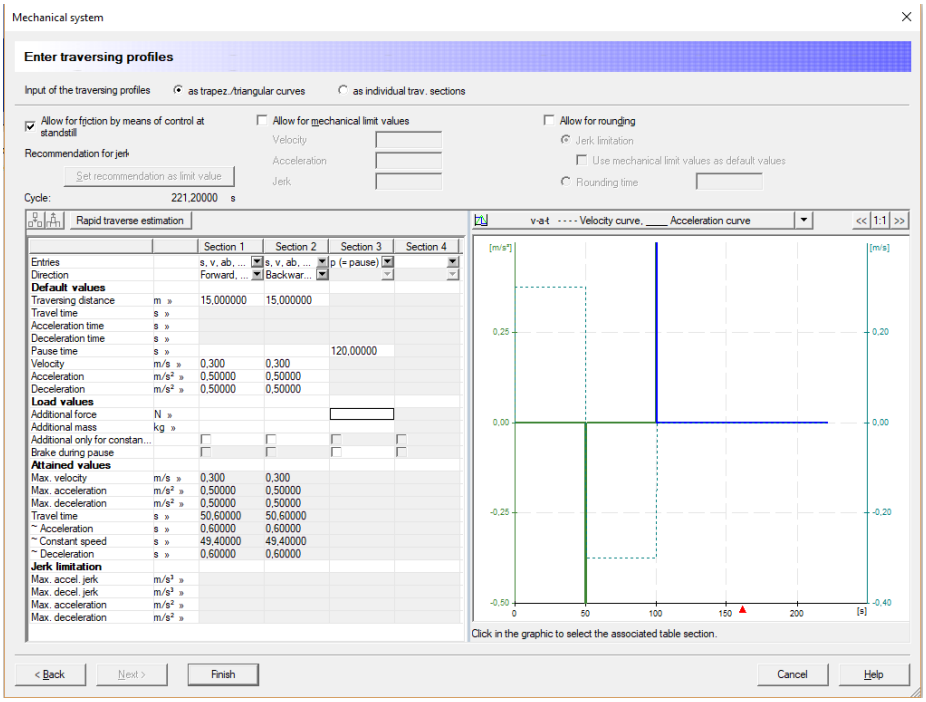


Figura 5.4.7 Ejemplo del Ciclo de Trabajo

2) Sistema de los drivers:

Al seleccionar el sistema de los drivers en el menú de la Figura 5.3.3, aparece una nueva ventana ramificada en la pantalla de la izquierda (Figura 5.4.8), aquí se configurará la fuente de alimentación al sistema y se realizará la configuración de los diferentes drivers disponibles.

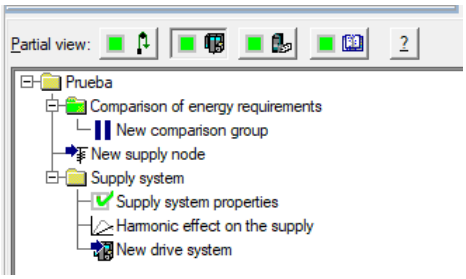


Figura 5.4.8 Sistema de los drivers

Por defecto, el sistema electromecánico viene con un nodo de suministro ya establecido, pero se podrán añadir más haciendo clic sobre "New supply node" o, cambiando el existente en "Supply system properties", se podrá delimitar la tensión de la fuente total, su frecuencia y si es monofásico o trifásico, aparte de más opciones.

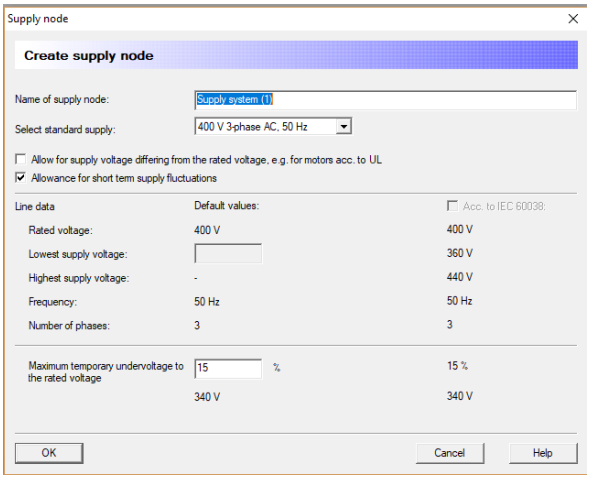


Figura 5.4.9 Nodo de Alimentación

Haciendo clic en "New drive system" en la Figura 5.4.8 se puede empezar a configurar los drivers de la instalación electromecánica.

Aparece una nueva ventana emergente (Figura 5.4.11), que más tarde se observará que pertenece adentro de la ventana "Properties" de la Figura 5.4.12.

Los pasos para configurar todo el sistema de drivers son los siguientes:

a. Properties: Establecer **Propiedades del sistema de drivers**

Siemens ofrece una gama muy variada de todos sus productos, tanto en su catálogo cómo en su servicio técnico. Por eso, primero se debería de mirar el tipo de drivers que se podrán necesitar para cada instalación electromecánica, así como el tipo de motor.

- Drivers

Para la adecuada comprensión de cual se ha de usar, se recomienda su búsqueda en la página de Siemens [14].

- Motores

Una vez se ha llegado (haciendo clic en "New drive system" en la Figura 5.4.8) a la Figura 5.4.11, si se pulsa en el botón "help", emerge una ventana con una tabla que muestra la siguiente información:

The following tables show this for all motor types that can be configured in SIZER:

Supply voltage range	380 V to 415 V	440 V to 480 V	380 V to 415 V	440 V to 480 V
DC link	Unregulated		Regulated	
1FT6	Yes	Yes	Yes	No
1FT7	Yes	Yes	Yes	Yes
1FK7	Yes	Yes	Yes	Yes
1PH8	Yes	Yes	Yes	Yes
1FE1	Yes	Yes	Yes	No
1FG1	Yes	Yes	Yes	Yes
1FN3	Yes	Yes	Yes	No *2
1FW3	Yes	No *2	Yes	No *2
1FW4	Yes	Yes	Yes	Yes
1FW6	Yes	Yes	Yes	No
1LA4, 1PQ4 *1	No	No	No	No
1LE1	Yes	Yes	Yes	No *2
1LE5	Yes	Yes	Yes	Yes
2KJ	Yes	Yes	Yes	No *2
S120 M	Yes	Yes	Yes	Yes
SIMOTICS FD	Yes	Yes	Yes	Yes
SIMOTICS GP/SD VSD10	Yes	Yes	Yes	Yes
SIMOTICS XP 1MB1	Yes	No	Yes	No

*1: These motors are relevant only for V_{Supply} > 500 V.

*2: This combination is not currently supported in SIZER.

Figura 5.4.10 Tabla Motor Type Help

Para, por ejemplo, un sistema mecánico de polea con un peso considerable, como el sistema definido anteriormente, se procederá de la siguiente manera (Figura 5.4.11):

- Single drives
- Sinamics G120 (Convertidor de velocidad- motores trifásicos, uso general) [15]
- Motor SIMOTICS GP/SD (Motor potente con rango hasta las 250 kW, síncronos)
- Load type → Mechanical system

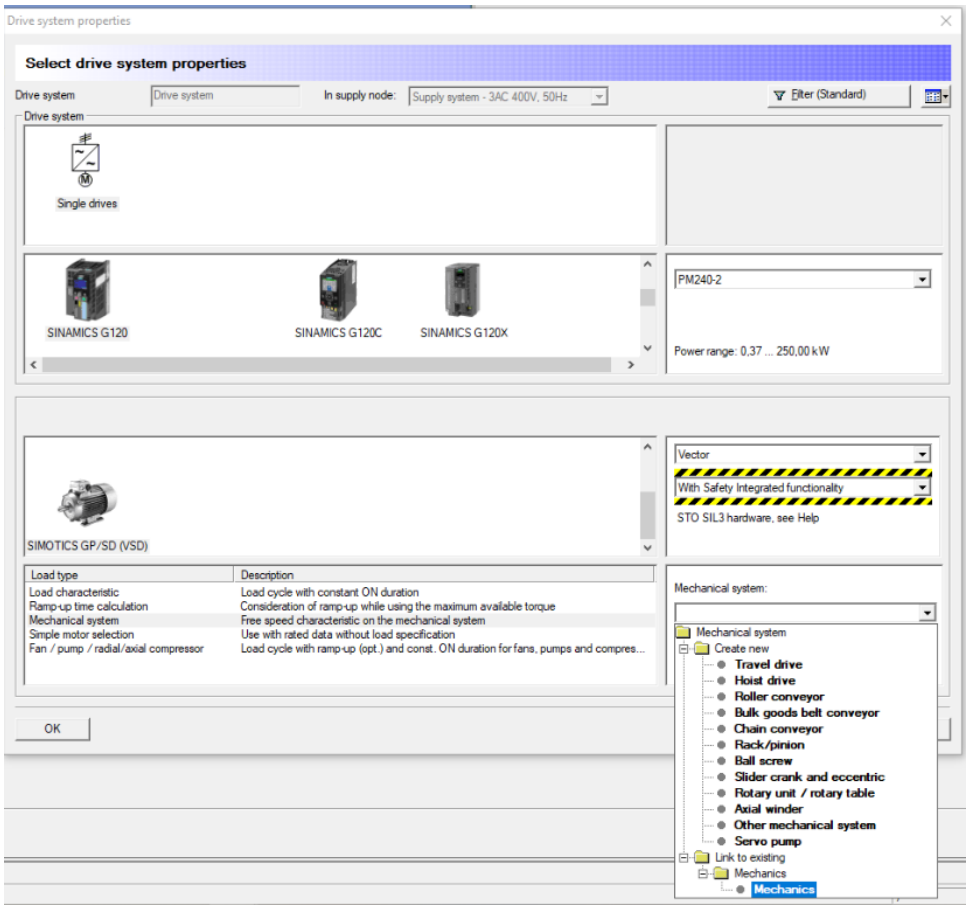


Figura 5.4.11 Add Drive System

Al elegir el variador SINAMICS G120, se observa a la derecha una pestaña que pone PM240-2. Esto es el Power Unit del variador de velocidad. El variador se compone de un power unit y de un control unit. Por defecto, el programa ha elegido, en este caso, la familia de power unit PM240-2. Más adelante se dimensionará de manera más específica.

El último paso de la elección del "Mechanical system" es **muy importante**, ya que es aquí donde se ha de vincular el sistema mecánico antes creado. Es indiferente el tipo de motor que se use. Siempre se ha de vincular al sistema mecánico creado anteriormente.

Si no se creó, es aquí donde se puede crear desde el principio, eligiendo cualquiera de los sistemas mecánicos dentro de la carpeta "create new" que se encuentra abajo a la derecha de la Figura 5.4.11.

Al haber sido ya creado anteriormente, se vincula al driver system en "Link to existing".

Si se desea dimensionar un proyecto sin vincular un sistema mecánico, se pueden elegir otras opciones como "Load characteristic" en Figura 5.4.11 abajo y, más adelante, limitar el motor mediante su par o su potencia, o "Simple motor Selection", si se conoce ya el motor a elegir directamente.

Al hacer clic en OK, aparece una nueva zona de trabajo llamada "Workflow" (se ve su localización en la Figura 5.4.32), en ella, hay una ventana emergente (Figura 5.4.12) donde el programa indica con un tic verde que ya se ha finalizado de dimensionar el paso a) Properties, siendo posible continuar con el dimensionado.

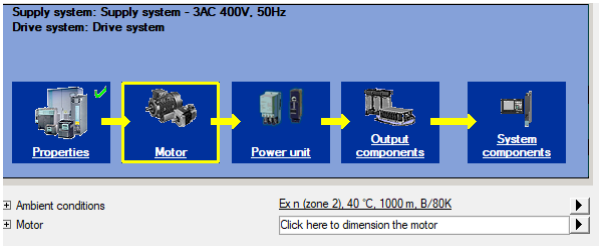


Figura 5.4.12 Paso Dimensionado del Motor

b. <u>Motor</u>: Establecer el **motor** que se usará en la instalación

En una instalación, se debe de tener en cuenta el lugar en el que el motor estará situado. Es por ello por lo que se deben establecer las condiciones ambientales haciendo clic en la flecha de "Ambient conditions", en la Figura 5.4.12.

Se podrá modificar:

- La altura de la instalación ("Installation altitude")
- Temperatura ambiente ("Ambient temperatura")
- Curva de calentamiento ("Temperature rise class")

Vienen unos valores ya por defecto.

A continuación, se accede al menú de <u>dimensionar el motor</u> ("Click here to dimension motor" en Figura 5.4.12). Emergerá una ventana (Figura 5.4.13) que contiene diferentes módulos, los cuales dependerán del motor elegido en el paso (5.4)-2)-a) Properties.

Para un motor tipo SIMOTICS GP/SD:

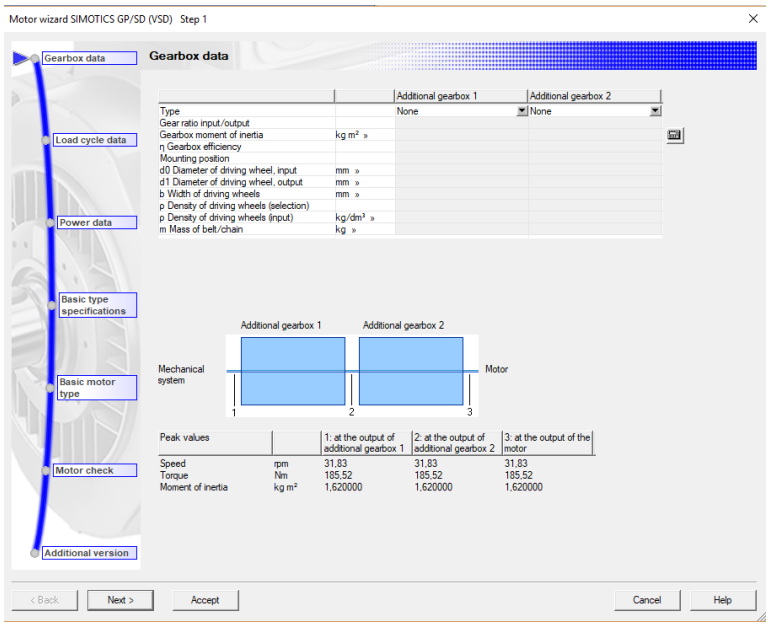


Figura 5.4.13 Motor Wizard

i) Gearbox data

En este módulo se pueden añadir hasta 2 sistemas de transmisión diferente. Pueden ser:

- Caja de cambios general (“General Gearbox”)
- Correa de transmisión (“Belt drive”)

Es decir, que es en la parte de arriba de la ventana, en “Additional Gearbox 1/2", donde se pueden introducir las reductoras que puede haber en el propio motor SERVO. A modo de ejemplo:

- General Gearbox
- En Gear ratio input/output, introducir la relación de reducción
- En effitiency, introducir el rendimiento

Para una caja de cambios general, se introducirán los datos requeridos. En el caso de ejercicios simples, solo se introducirán datos de la relación de transformación y el rendimiento de la reductora/multiplicadora. La relación de transformación será el valor de la división: $Velocidad\ alta / Velocidad\ baja$

ii) Load Cycle Data

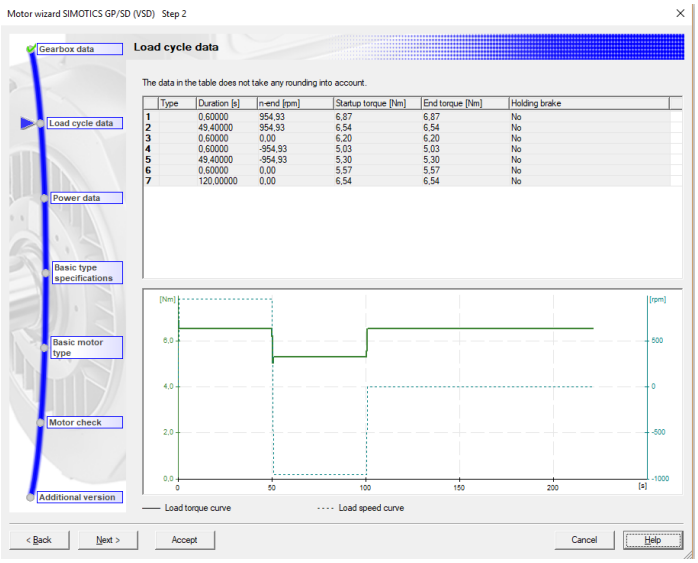


Figura 5.4.14 Load cycle data

Este módulo tiene su origen en la definición del ciclo de trabajo del punto (5.4)- 1)- b), en lo que se refiere a la velocidad y movimiento del sistema mecánico traducido al punto de vista del motor. Las rectas que se ven son la del par de carga y la de la velocidad angular de la carga.

iii) Power Data

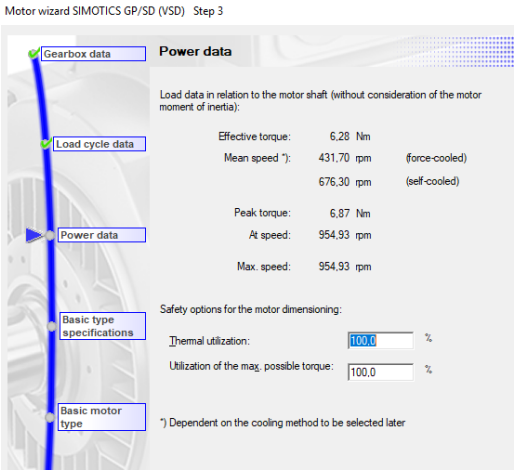


Figura 5.4.15 Power Data

Este módulo muestra la información de la carga y el sistema mecánico desde el punto de vista del eje del motor.

El par efectivo y el par máximo, así como las velocidades de giro del motor para el sistema mecánico especificado, ya han sido calculadas por Sizer y, gracias a los factores de utilización térmica y de máximo par, se podrá limitar al valor deseado para así tener más seguridad de la instalación.

iv) Basic Type Specifications

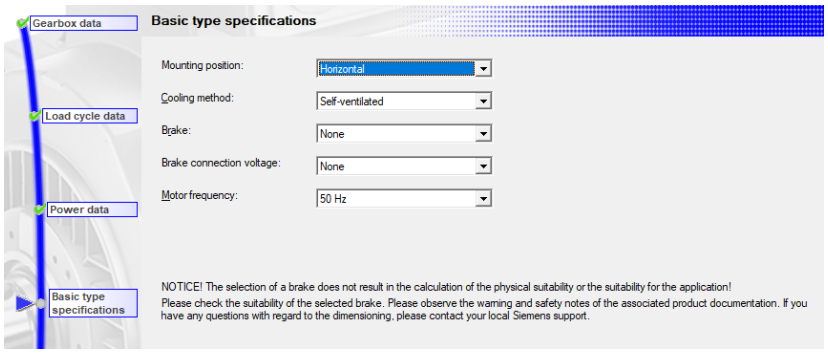


Figura 5.4.16 Basic Type Specifications

En este módulo se configura el montaje del motor:

- Posicionamiento horizontal o vertical
- Método de refrigeración (Auto ventilado o con ventilación forzada)
- Sistema de frenado
- Tensión del sistema de frenado
- Frecuencia del motor

v) Basic Motor Type

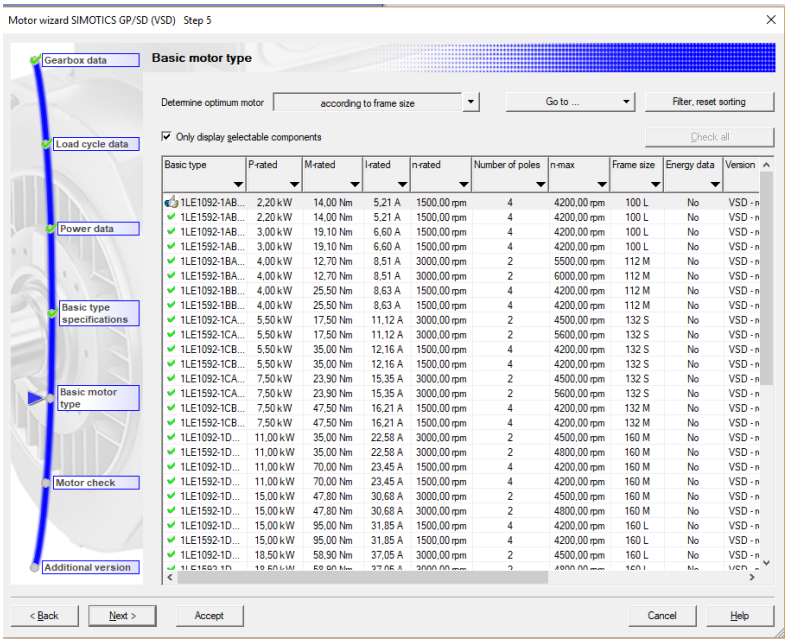


Figura 5.4.17 Basic Motor Type

En este módulo se muestran todos los motores del tipo SIMOTICS GP/SD. Aquí procede el programa Sizer a elegir el más adecuado para la instalación electromecánica que se está diseñando.

Para que el programa escoja el motor como vemos en la Figura 5.4.17 hay que dar los siguientes pasos:

- Clic en “Check all” (muestra con un tic verde todos los posibles)
- Clic en “according to frame size” o bien cambiar esa opción a “according to load current” y hacer clic ahí.

Interesa realmente limitar el motor por su “Frame size” ya que, en aplicaciones reales, cuanto más grande sea el motor, más caro será y más difícil instalar en cuanto a logística.

Aparecerá entonces con el símbolo de un pulgar hacia arriba el motor más apropiado para el dimensionado.

vi) Motor Check

Este módulo muestra la información de la carga calculada más importante, la utilización del motor y una gráfica de las características de la carga y del motor.

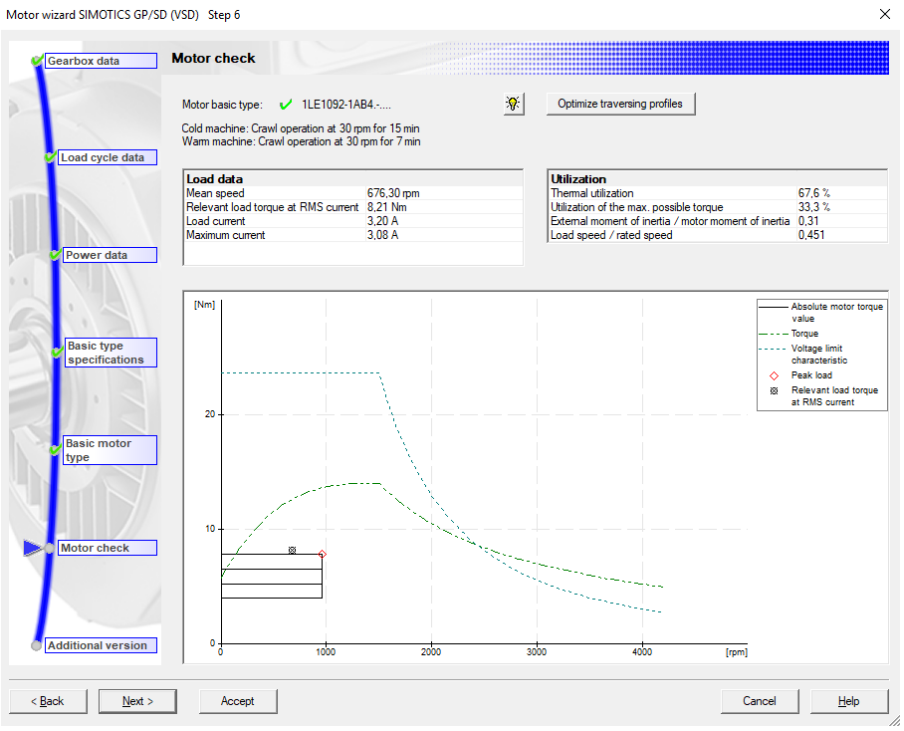
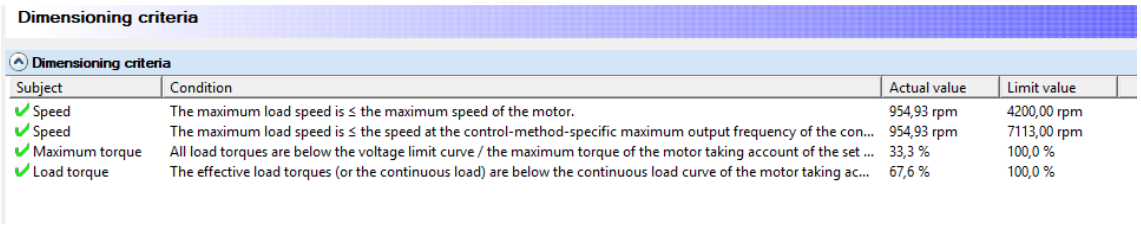


Figura 5.4.18 Motor Check

Haciendo clic sobre la bombilla en la parte superior de la ventana emergente (Figura 5.4.18) aparece la información del criterio del dimensionado, mostrando con tics verdes o cruces rojas la situación actual del dimensionado.



Dimensioning criteria

Dimensioning criteria

Subject	Condition	Actual value	Limit value
✔ Speed	The maximum load speed is ≤ the maximum speed of the motor.	954,93 rpm	4200,00 rpm
✔ Speed	The maximum load speed is ≤ the speed at the control-method-specific maximum output frequency of the con...	954,93 rpm	7113,00 rpm
✔ Maximum torque	All load torques are below the voltage limit curve / the maximum torque of the motor taking account of the set ...	33,3 %	100,0 %
✔ Load torque	The effective load torques (or the continuous load) are below the continuous load curve of the motor taking ac...	67,6 %	100,0 %

Figura 5.4.19 Criterio de Dimensionado

Si algo apareciese con una cruz roja sería debido a que se supera alguno de los valores límite indicados y habría que modificar los datos para que todo estuviese correcto.

La gráfica de la Figura 5.4.18 muestra información del par de carga y el par máximo que puede desarrollar el motor en función del sistema mecánico previamente establecido.

Las líneas de funcionamiento del motor de la gráfica siempre han de estar por encima de los dos puntos de carga que se necesiten (zona de debajo de la gráfica Figura 5.4.18), "Peak load" y "Relevant load torque". Esto significa que el motor puede cubrir estos dos puntos de trabajo relevantes y es por eso válido para la instalación. Si no fuese así, el programa indicaría que el motor no es válido, y habría que elegir otro motor o cambiar los valores de inercia.

Problema común: "External moment of inertia / motor moment of inertia" aparece en rojo. Se debe a que el motor no tiene fuerza suficiente para comenzar a moverse con la carga.

Solución: Añadir reductoras al sistema, en la parte (5.4)-2)-b)-i) así se reducirán las relaciones de inercia.

vii) Additional Version

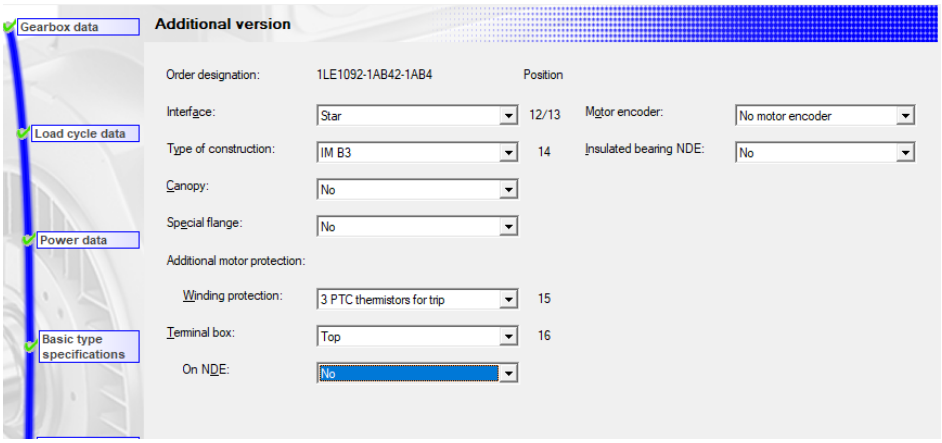


Figura 5.4.20 Additional Version

En este último módulo se permite la especificación de más elementos acoplados al motor:

- Encoder
- Tipos de ejes en su salida
- Grado de protección del motor
- Eje plano o con chavetas
- Etc.

El programa permite elegir cualquiera de estos elementos y, una vez acabado, haciendo clic en "Finish", se terminaría el dimensionado del motor.

El programa vuelve al espacio de trabajo "Workflow", según aparecía en la Figura 5.4.12. Ahora aparecerá un tic verde encima del paso "Motor", permitiendo añadir varias especificaciones y opciones más al motor, no es necesario ya que toda la información esencial ya está especificada.

En este momento procedemos al siguiente paso.

c. **Power Unit:** Establecer el **Power Unit** de la instalación electromecánica

Ahora solo falta introducir el drive a la instalación electromecánica. El motor no está directamente conectado a la red, sino que el drive propio alimentará al mismo motor. Esto es a través del power unit.

Al igual que con el motor, existen opciones de:

- **Ambient Conditions:** Se usa para indicar la temperatura y altura de la ubicación de donde se situará el power unit y así cambiar las condiciones ambientales si se necesitase.

- **Botón de power unit:**

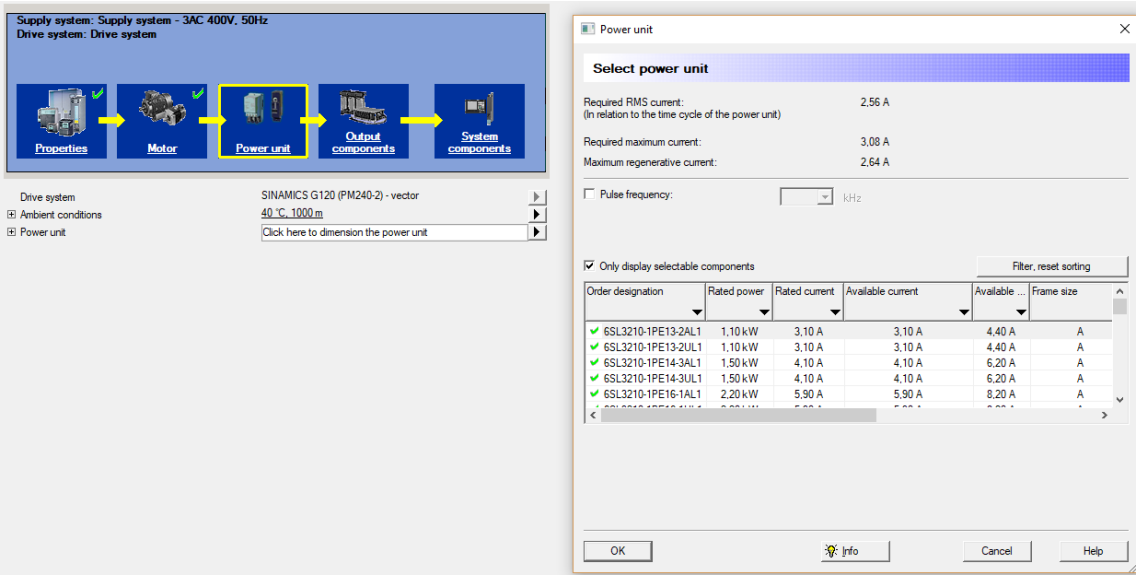


Figura 5.4.21 Power Unit Selection

Con la nueva ventana emergente, se pueden filtrar todos los power units en función de:

- Potencia
- Corriente
- Tamaño del marco
- Etc.

Viendo el requerimiento de corriente por parte del motor, en la parte superior de la ventana de Power Unit (Figura 5.4.21), donde pone “Required RMS Current”, Sizer mostrará los drives que puedan dar esa corriente y que se puedan conectar a la tensión que se haya especificado en el supply node.

Si se hubiesen indicado posibles sobrecargas en la instalación, el programa también mostraría la **corriente máxima** (150% de la corriente base del variador de velocidad) necesaria y lo tendría en cuenta para la selección del drive.

Sólo se podrán seleccionar aquellos elementos con un tic verde. El programa, en función del motor elegido, ya filtra directamente los que se pueden usar. Si no existen preferencias se podrá seleccionar cualquiera de ellos, siendo el primero de la lista el más pequeño y por tanto el más barato.

Una vez se hace clic en OK, aparece en el Workflow una nueva opción:

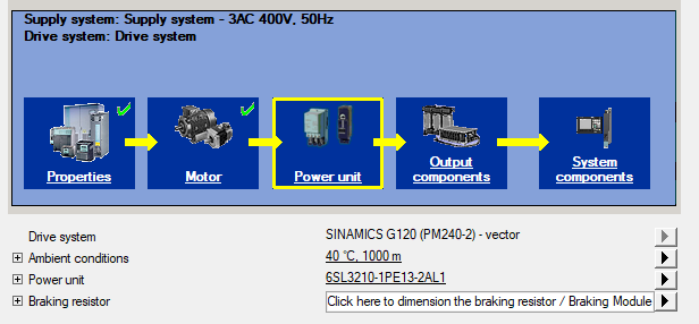


Figura 5.4.22 Braking resistor

- **Braking resistor:** Se puede añadir un freno de resistencias (usado para disipar el calor generado cuando el motor frena de manera interna). En el caso de querer tener uno para acoplarlo en el power unit, se seleccionaría haciendo clic en "dimension the Braking resistor" y se elegiría seleccionándolo como se muestra en la Figura 5.4.23:

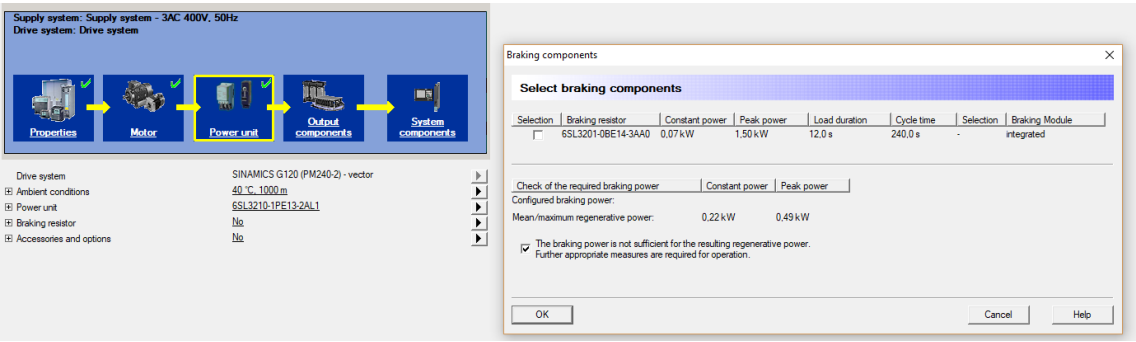


Figura 5.4.23 Braking resistor config.

Al seleccionar Ok, Sizer te da la opción de añadir accesorios al power unit como, por ejemplo, el Screening Kit, que son unas placas que garantizan la correcta y segura puesta a tierra para todos los cables salientes y entrantes al variador de velocidad.

Una vez dimensionado, con el tic verde sobre el paso Power Unit, podemos continuar el proceso.

d. **Output Components:** Seleccionar las diferentes opciones de **Output**

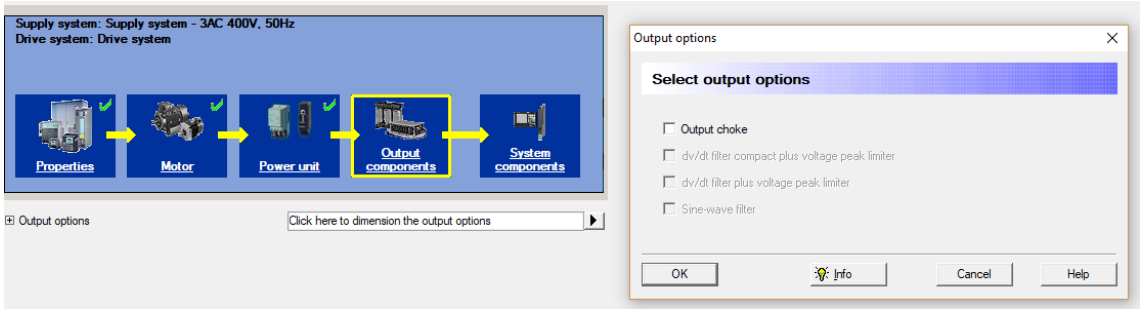


Figura 5.4.24 Output Components

Este paso permite incorporar a los drivers un "ouput choke" (bobina de ahogo), lo cual evita el estrés adicional que se forma cuando hay motores conectados con un cableado consideradamente largo.

Cuando el cableado es muy largo podrían ocurrir picos de corriente en el driver y daños en el aislamiento de los devanados del motor, aunque el variador en sí es una manera de proteger al motor ante posibles fallos en la red.

Las otras opciones (si estuviesen disponibles, según el driver elegido) permiten incorporar filtros dv/dt con limitador de picos de voltaje, que eliminan los picos de tensión y lo alimentan de vuelta a la parte de DC.

Una vez seleccionada una de las opciones, se ha de dimensionalizar el cable de alimentación al motor y al ventilador externo a usar en cuanto a tipo, medida, sección, etc.

Haciendo clic en ok en la Figura 5.4.24, aparecerá en el Workflow la nueva opción de modificar la acometida principal y el encoder ("Power cable" & "Encoder evaluation"):

Power cable

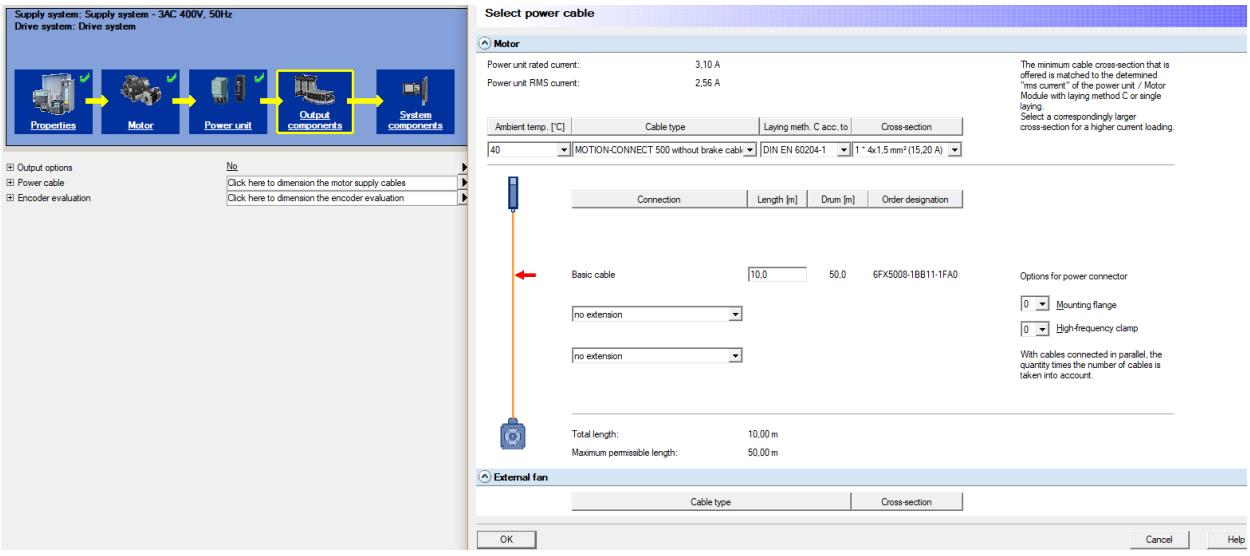


Figura 5.4.25 Cable de Alimentación al Motor

Se podrán modificar las características de la acometida principal del power unit al motor, o incluso del cable que se usaría para el ventilador externo de refrigeración.

Dependiendo de la carga aparecerá un cable de manera predeterminada, pero se puede dimensionar, por ejemplo, la longitud de este mismo y en vez de 10m de cable, usar 5m:

- Cambiar 10.0 a la derecha de "Basic cable" a 5.
- Clic en OK

Dentro de la opción "Cable type", se puede elegir:

- Motion-Connect 500: Si el cable que se desea es rígido, para instalaciones en las que el motor esté fijo.
- Motion-Connect 800: Si se desea un cable flexible, para instalaciones en las que el motor se está moviendo constantemente.

Cualquier otra de las opciones se puede cambiar acorde con lo deseado.

Si se ha elegido un encoder anteriormente, (5.4)-2)-b)-vii), ahora se podrá visualizar el número del producto de pedido, así como sus características.

Una vez dimensionado, con el tic verde sobre el paso Output Components, es posible continuar.

e. **System Components:** Finalización del dimensionado, añadiendo **componentes del sistema**

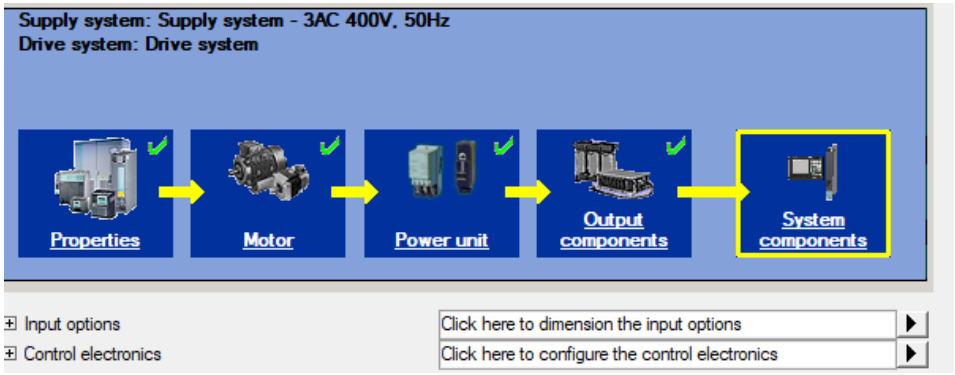


Figura 5.4.26 System Components

La opción final que aparece en el Workflow:

- **Input Options**

Estas opciones permiten incorporar, aguas arriba de la instalación, determinadas protecciones.

Se pueden incorporar más componentes, como la bobina de ahogo en la entrada al power unit "line choke", un seccionador guardamotor "circuit breaker" o fusibles para la conexión aguas arriba entre la red y el power unit. Se trata de todos aquellos elementos que protegerán la instalación.

Si no se desean más opciones, clic en OK.

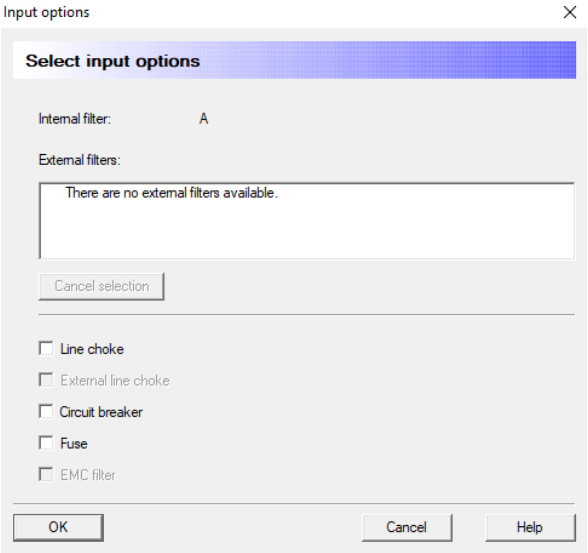


Figura 5.4.27 Input Option Selection

Para configurar los control electronics, directamente se puede hacer clic en OK, que lo seleccionará automáticamente, y proceder a la siguiente parte de Sistema de Control.

3) Sistema de Control:

Al seleccionar el botón de sistema de control en el menú de la Figura 5.3.3, aparece la ventana mostrada en la Figura 5.4.28, en la parte izquierda de la pantalla:

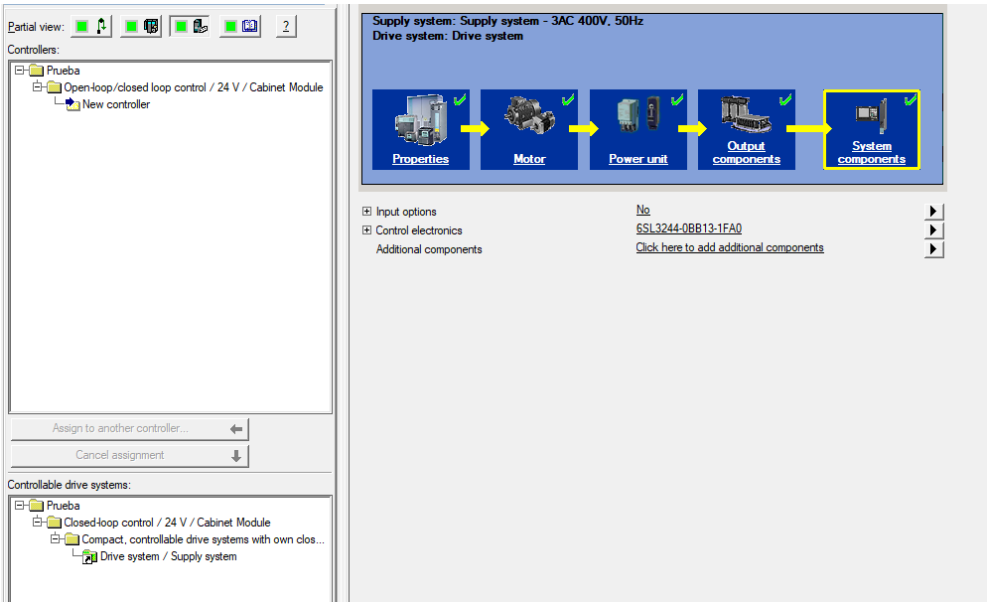


Figura 5.4.28 Sistema de Control

El sistema necesita ahora un controlador que gestione el proceso que se le asigne, y es aquí donde se define el lazo de control.

Haciendo clic en “New controller”, (Arriba a la izquierda en Figura 5.4.28), se muestra una ventana con las familias de controladores soportadas por Sizer:

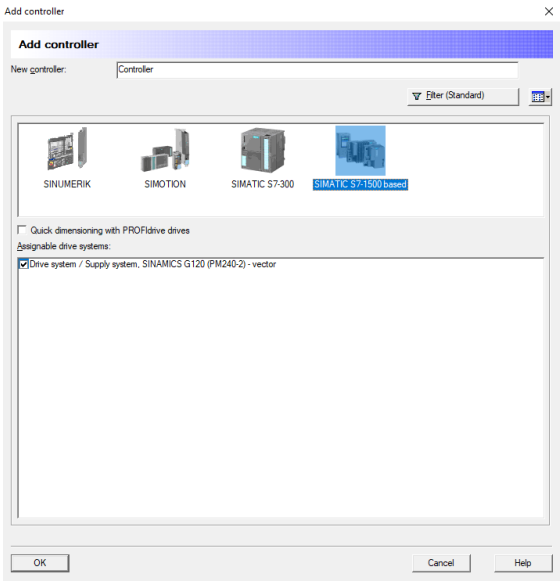


Figura 5.4.29 Add controller

Aquí aparecen algunos sistemas de drives ya configurados que se pueden asignar de inmediato. Para conocer el controlador que se necesita en la instalación, se puede visitar la página de Siemens [16].

Dentro de la web, haciendo clic en "Start web application", aparece un pequeño cuestionario preguntando por las aplicaciones que tiene la instalación electromecánica que se está diseñando:

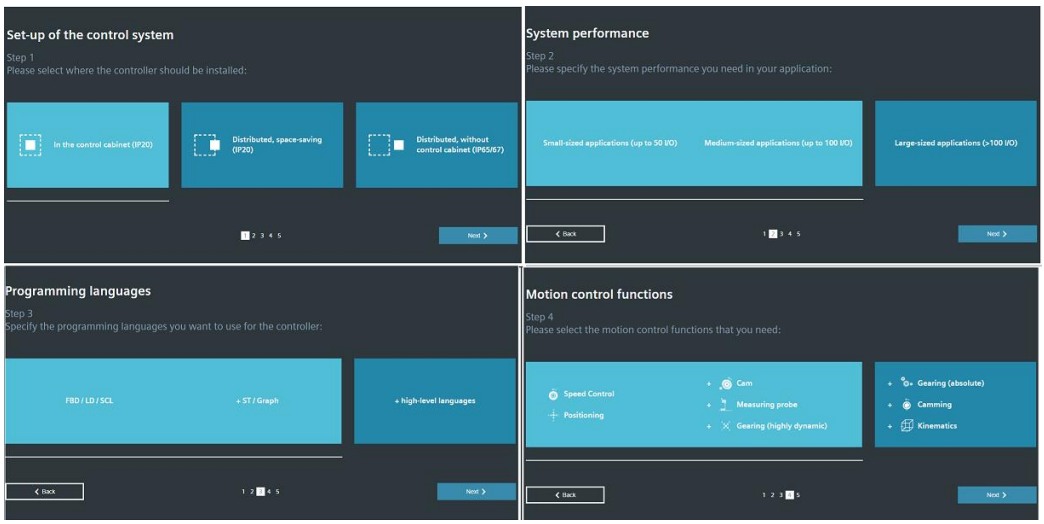


Figura 5.4.30 Selección Control Syst. (1)

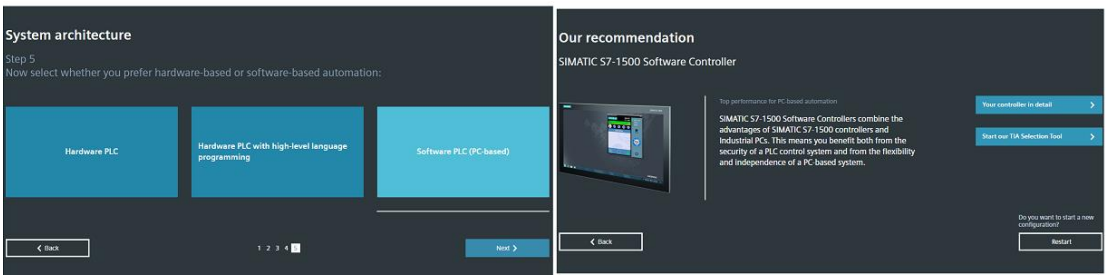


Figura 5.4.31 Selección Control Syst. (2)

Una vez conocida la unidad de control que se desea, se selecciona en Sizer, haciendo clic en su icono, y después en la caja de "Assignable drive systems" (Figura 5.4.29). Se hace clic en OK, y aparece la siguiente ventana (Figura 5.4.33), que será una nueva pestaña que aparecerá al lado del Workflow en la parte inferior del programa como "Open-loop/ closed-loop/ 24V/ Cabinet Modules":

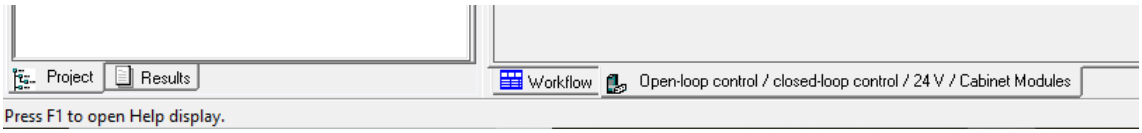


Figura 5.4.32 Pestañas inferiores

Es ahora el momento en el que se va a dimensionar el "layout" de la electrónica de control.

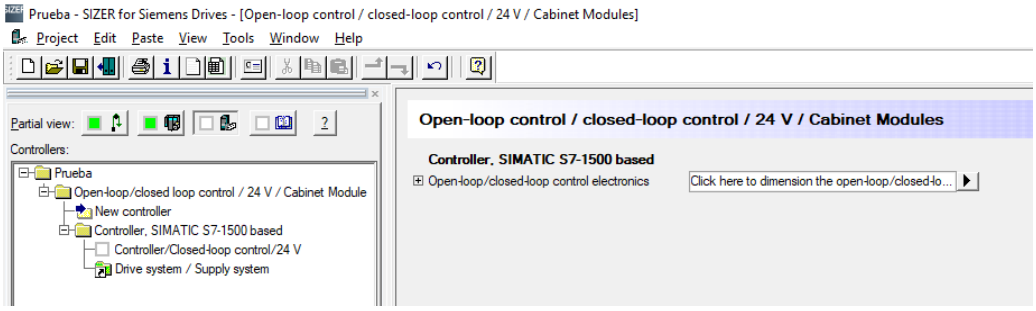


Figura 5.4.33 Definición Control Syst.

Al hacer clic en dimensionar (en Figura 5.4.33), aparece una nueva ventana:

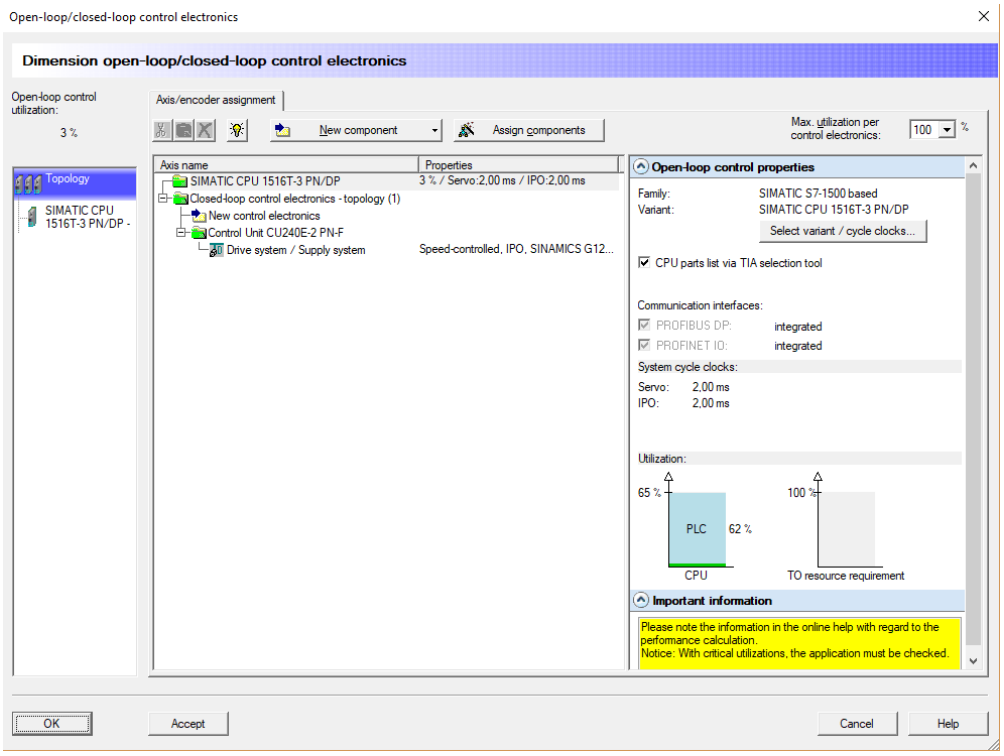


Figura 5.4.34 Dimensionar controlador

Esta ventana muestra información ramificada del PLC:

- El eje que el sistema tiene ("Drive system / Supply system")
- La tarjeta de control "Control Unit CU240E-2 PN-F).

Al hacer clic en el eje, permite indicar si se desea que controle el proceso en función del posicionamiento, velocidad, operaciones síncronas, etc.

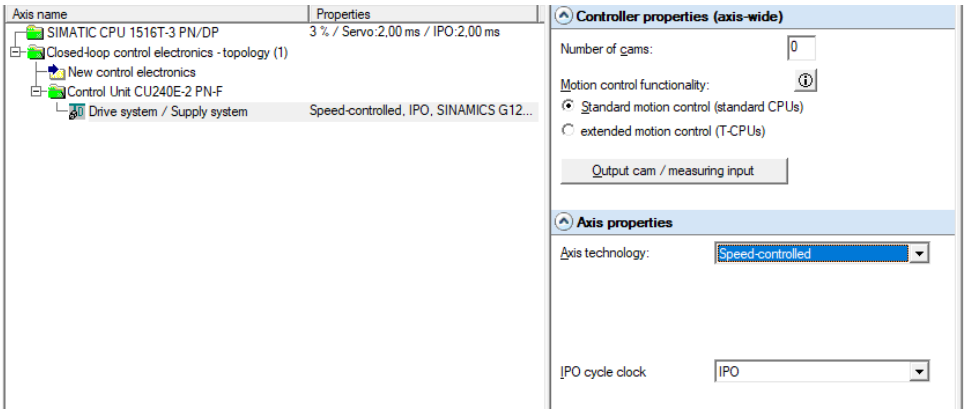


Figura 5.4.35 Axis Properties

El controlador se irá modificando en función de los usos que tenga la instalación electromecánica y, según se vayan añadiendo elementos, la ventana muestra el uso en porcentaje que se está utilizando en el PLC. (Arriba a la izquierda Figura 5.4.35).

Una vez definida ya la tarjeta de control, haciendo clic en OK, habrá que ordenar los ejes del drive.

Aparece en la Figura 5.4.33 una nueva opción “Installation Arrangement”.

Lo más simple es tener una instalación monoeje, por lo que esto último no es tan relevante. No habrá ningún orden de actuación entre ellos, porque sólo hay uno.

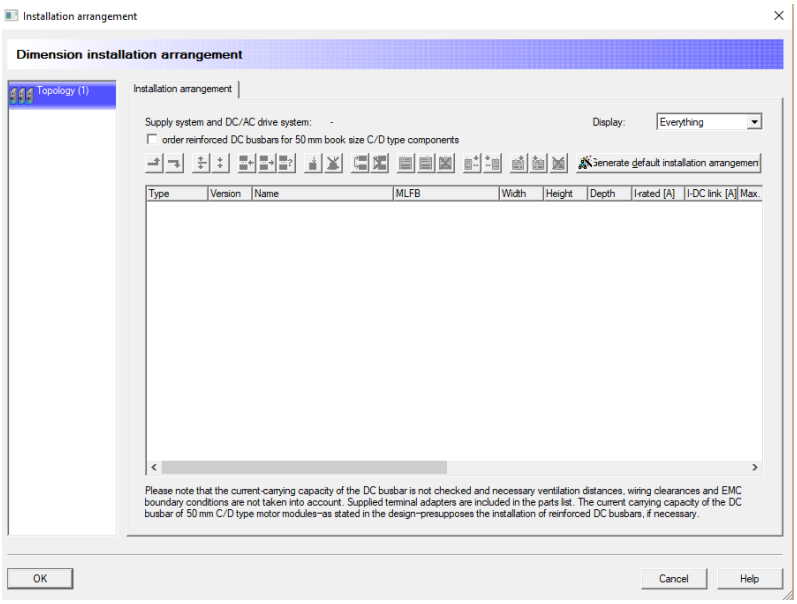


Figura 5.4.36 Orden de los ejes

Haciendo clic en OK, vuelve a aparecer la Figura 5.4.33 con otra nueva opción “Drive Cliq topology”.

Para instalaciones más completas que no son monoeje, se podrá decidir dónde se conecta cada elemento, por ejemplo, si tengo varias control units se puede decidir dónde se encontraría un encoder.

Lo más simple es tener monoeje y no sería necesaria la especificación del cable que tendría la conexión.

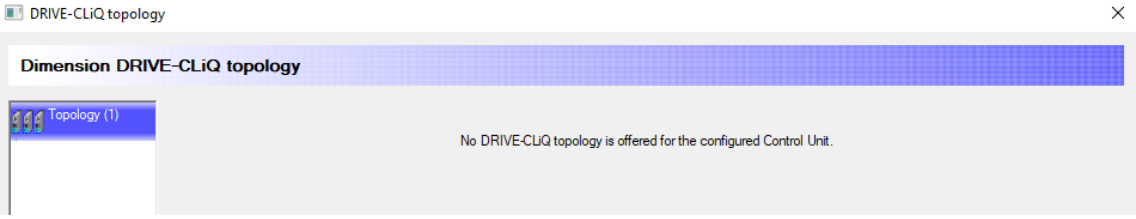


Figura 5.4.37 Topología PLC

Clic en Next y Finish.

Y para finalizar, aparece la última opción en la Figura 5.4.33 “24 V Supply”.

Aquí se seleccionará, si fuese necesario, una fuente que alimentaría los elementos a los que la tensión de red no fuese válida.

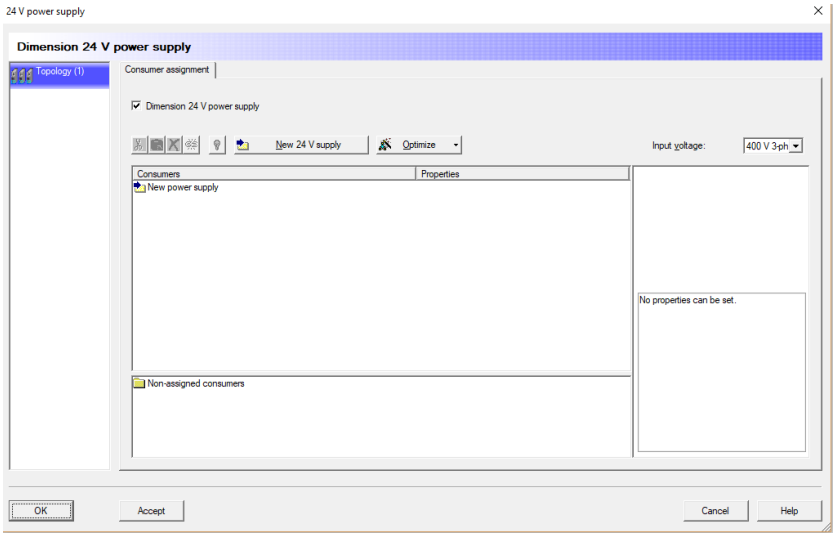


Figura 5.4.38 24V Supply

En caso de que fuese necesario, para que Sizer dimensionase la fuente más pequeña posible, haríamos clic en “Optimize” Figura 5.4.38. Se selecciona “Smallest possible" y el programa automáticamente selecciona la fuente más apropiada.

Si se desea selección manual, haríamos clic en “New power supply” y se seleccionaría el deseado.

Clic en OK, y ya estaría todo dimensionado.

4) Componentes Adicionales:

Al seleccionar el botón de sistema de control en el menú de la Figura 5.3.3, aparece la ventana mostrada en la Figura 5.4.39, en la parte izquierda de la pantalla.

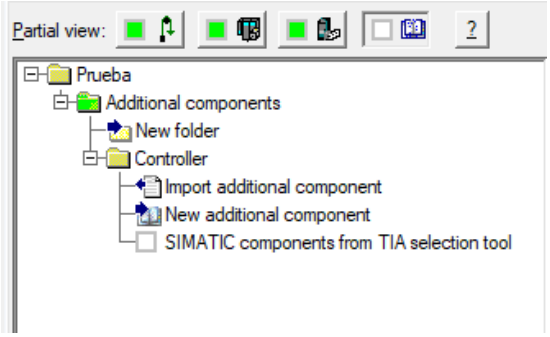


Figura 5.4.39 Componentes Adicionales

Esta opción está en relación con el catálogo de Siemens. Al introducir algún número de pedido de algún elemento, se podrá incorporar al sistema.

Haciendo clic en el cuadrado en blanco "SIMATIC components from TIA Selection tool" se abre una ventana que muestra una opción de editar todos los elementos presentes en la instalación electromecánica en TIA selection tool, una aplicación de Siemens para optimizar la instalación.

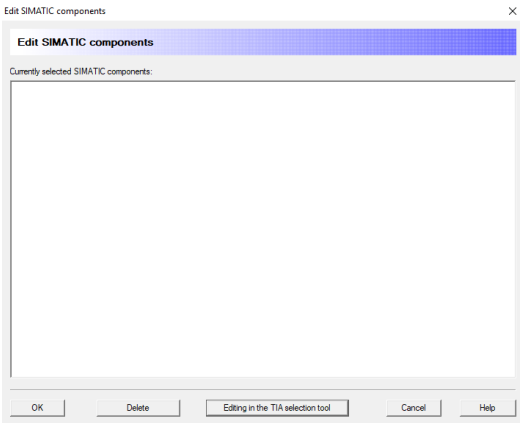


Figura 5.4.40 SIMATIC Components

Para terminar, haríamos clic en OK, apareciendo el cuadrado de la Figura 5.4.39 con un tic verde.

5.5. Finalización del Proyecto

Una vez dimensionado todo, se pueden ver ya los resultados, haciendo clic en "Results" en la esquina inferior izquierda. (Ver Figuras 5.3.1 y 5.3.2).

Dentro de Results, aparece un esquema ramificado mucho más completo de cómo estaba al principio del dimensionado (Figura 5.3.2). Ahora tiene todos los elementos que se han ido añadiendo a lo largo del proceso (Figura 5.5.1), así como información adicional para visualizar:

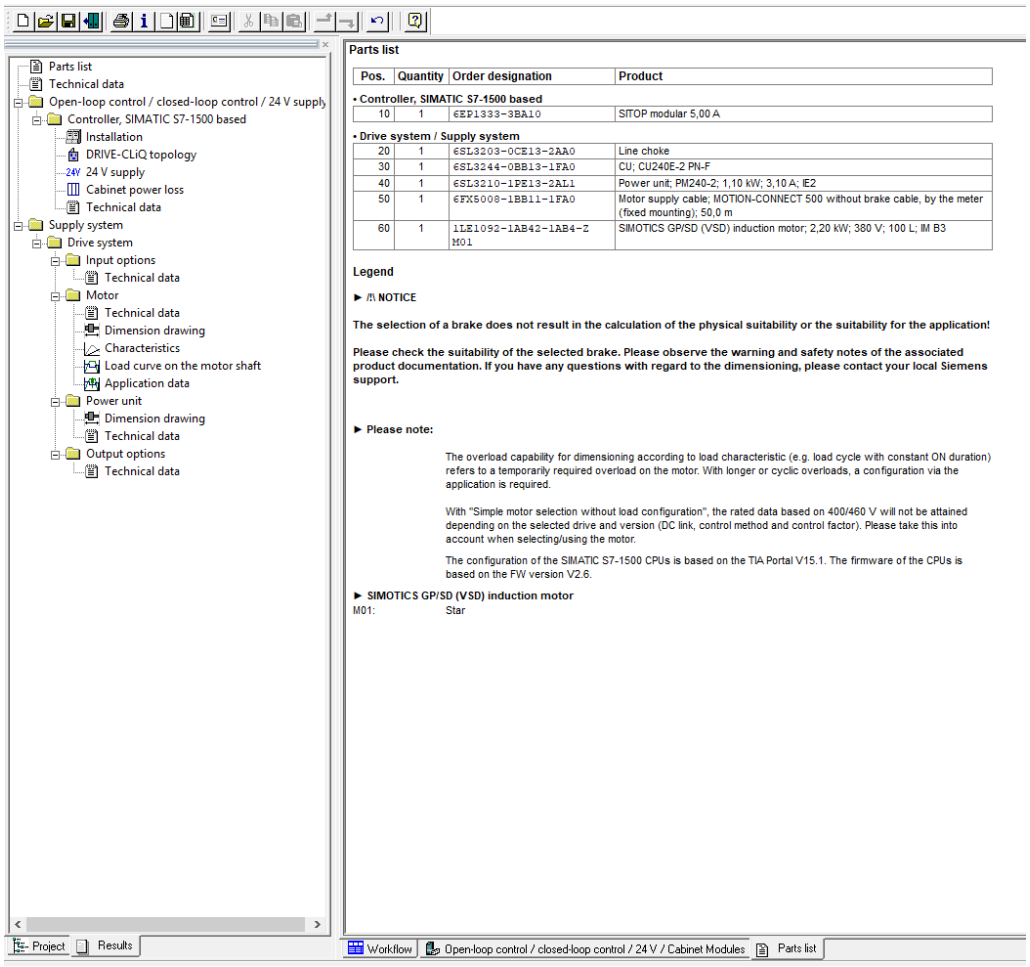


Figura 5.5.1 Ramificación Results

Las ventanas de más importancia son:

- **Parts list:** Esta ventana contiene la información del proyecto, mostrándose como una lista en posiciones individuales. Cada posición contiene la cantidad, el número de pedido y la información técnica más importante de cada componente.

  Con esta hoja, se podría realizar el pedido directamente a Siemens.

- **Technical data** Esta ventana contiene la información de la instalación completa respecto a la tensión de la instalación necesaria, características del motor, etc. Toda esta información puede ser exportada en un fichero Excel preparado para SAP VSR, haciendo clic en Tools y Export SAP data.

Las demás ventanas, muestran información técnica sobre los elementos seleccionados, así como la gráfica de funcionamiento del motor, y dibujos en formato CAD de aspecto técnico.

Aparte de Sizer, que es el asistente de trabajo, hay otros softwares de Siemens que se pueden descargar de manera complementaria para diferentes usos, entre ellos, TIA Portal (mencionado anteriormente) o el asistente online DT-Configurator, que muestra todo el catálogo de Siemens.

En el catálogo, una vez tenemos una idea del tipo de motor y del proceso que se necesite, se podrá consultar exactamente el producto necesario.

6. Uso del Sizer para la resolución del cabestrante

Mediante Sizer se podrá resolver el ejercicio del cabestrante de manera sencilla y rápida.

Para que el programa tenga una simulación lo más parecida posible a la realidad, habrá que definir el sistema correctamente. Una de las opciones era definirlo como una bobinadora (Axial Winder) ya que, por una parte, según se va recogiendo el cable el peso va incrementando y, por otra, se iría aislando la parte motora. Esto es lo que más se asimila a la realidad, pero en este TFG se ha tomado un cable con peso nulo y en el sistema de la bobinadora sólo se pueden definir las inercias y la velocidad entrante del cable, **no la fuerza motriz necesaria para mover el vehículo**. Es por ello que, en la definición del sistema mecánico en el programa, se pondrá una polea (Hoist Drive), que es lo que más se asimila a todo el sistema completo. En Sizer, este sistema viene por defecto definido como una polea vertical. En este caso, el peso del vehículo no serán los 2000 kg que se indicaban en el enunciado. Se deberá sobredimensionar la instalación, aunque un cabestrante que pueda levantar un vehículo de forma vertical sería excesivo, por lo que:

$$Peso = m \cdot g \ \rightarrow Peso = 19.600\ N$$

$$Peso_{30^\circ} = m \cdot g \cdot \sin(30) \rightarrow \ Peso_{30^\circ} = 9.800\ N$$

Si 9800 N son evaluados de manera vertical:

$$Peso = m \cdot g \ \rightarrow m = \frac{9800\ N}{9{,}81} \ \rightarrow \boxed{m = 1.000\ kg}$$

Si sólo se tiene en cuenta el factor de resistencia a la rodadura (ya que la resistencia aerodinámica es casi insignificante), se añadirá entre un 5-10% más de peso para sobredimensionarlo, quedando un total de 1.100 kg.

El problema de esto es que se está engañando al programa y se están eliminando inercias. Es por ello por lo que, para compensar los efectos dinámicos, en la inercia de la carga se dará un valor asociado a los 1.000 kg que no se están teniendo en cuenta, que serán:

$$J = m \cdot {R_{rodillo}}^2 \ \rightarrow J = 1000\ kg \cdot 0{,}1^{\ 2} \ \rightarrow \boxed{J = 10\ kgm^2}$$

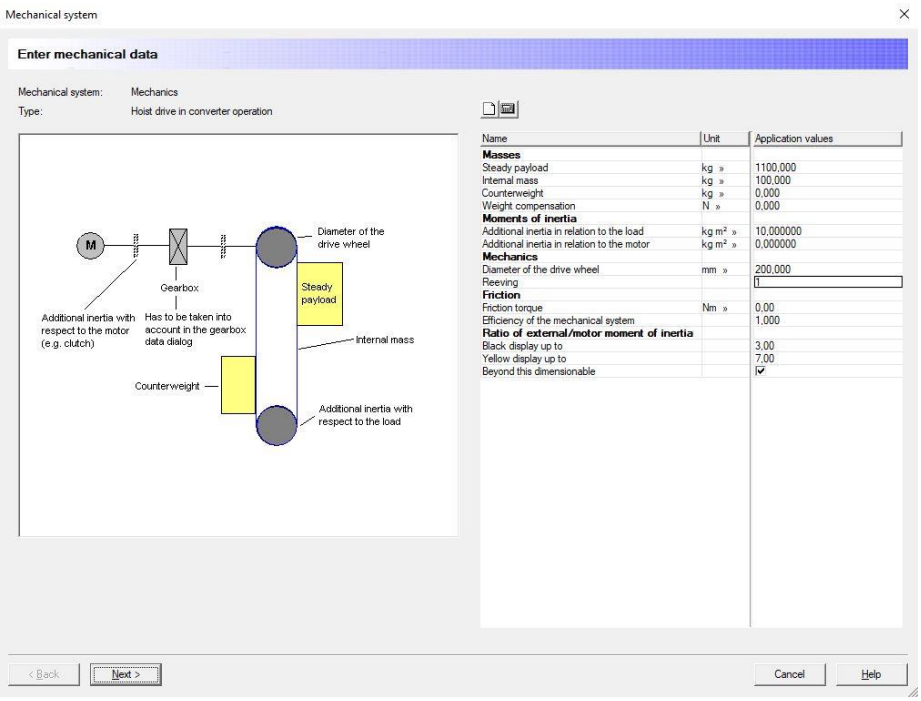


Figura 6.1 Sistema mecánico del cabestrante

Seguidamente se define el ciclo de trabajo. En el caso que nos ocupa sólo se ha definido la parte de subida del vehículo por la rampa, ya que es ahí donde hay que desarrollar el mayor par. El orden del proceso es el siguiente:

- En 0,5 segundos alcanza 0,5 m/s, es decir, aceleración de arranque de 1 m/s^2
- Después avanza 5,5m a 0,5m/s.
- Por último, realiza una frenada controlada a 0,1 m/s^2, para que no sea brusco.

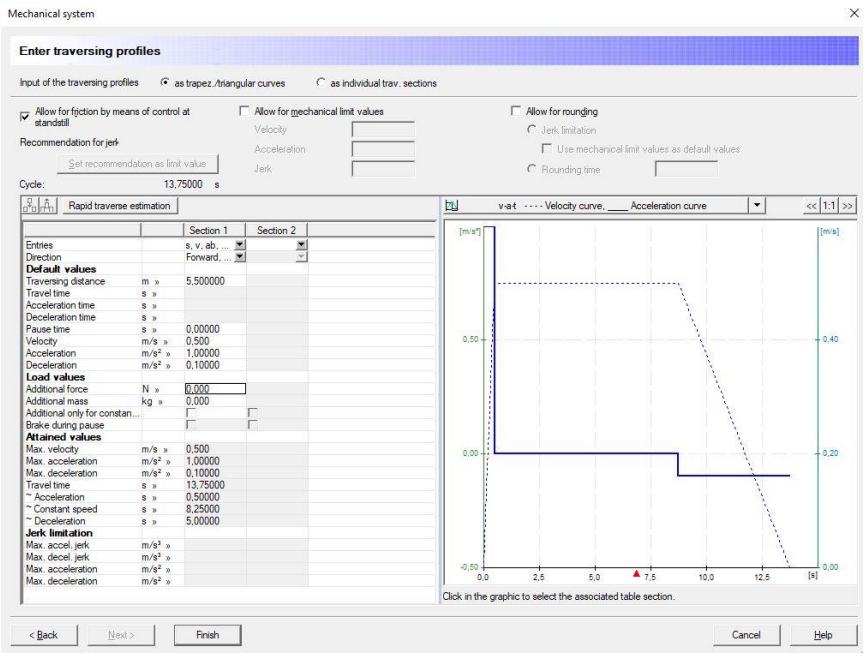


Figura 6.2 Ciclo de trabajo del cabestrante

Como se puede apreciar, en la Figura 6.2, se muestra la gráfica con las curvas de velocidad y de aceleración, que muestran de manera más visual el ciclo de trabajo. En la curva de velocidad (la discontinua), se aprecia claramente cómo la carga asciende desde el reposo hasta llegar a la velocidad definida de 0,5 m/s y se mantiene constante hasta que recorre toda la distancia especificada. Por último, empieza decayendo de manera prolongada y suave, con poca pendiente, hasta llegar a 0.

En la siguiente ventana se define el drive system. Aquí se elige single drive, el variador de velocidad a utilizar y la clase de motor, vinculándolo todo al sistema mecánico previamente definido.

Hay que asegurarse que donde pone In Supply Node arriba en la Figura 6.3 está en 230V.

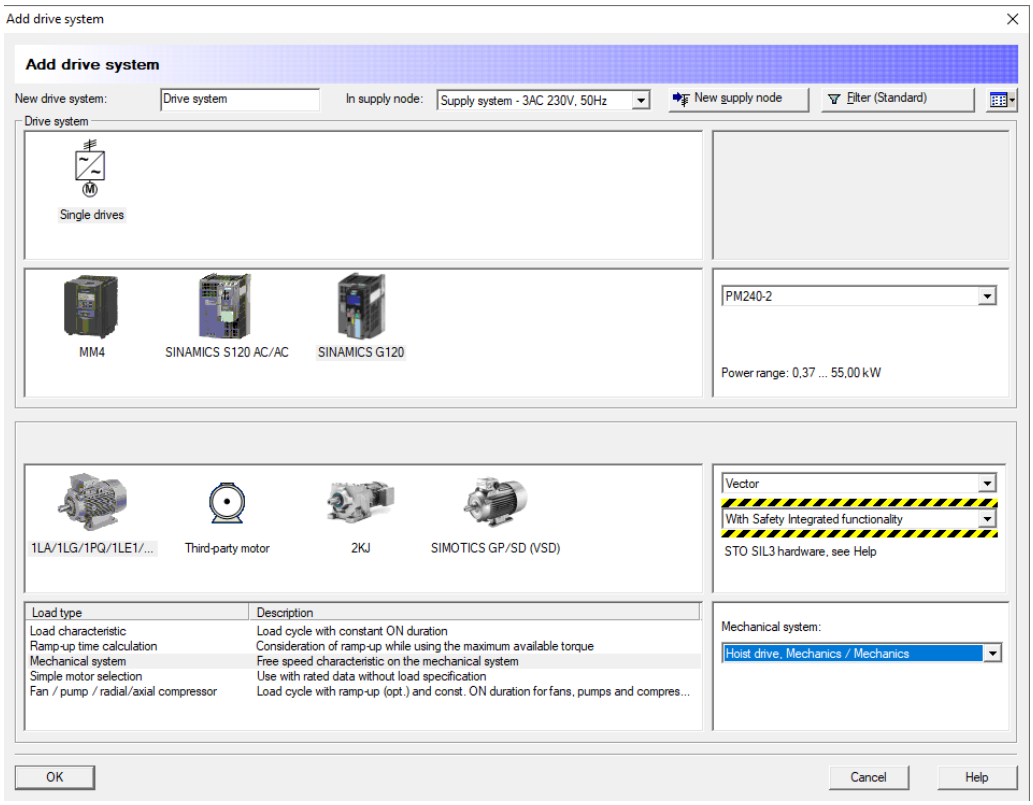


Figura 6.3 Drive System del cabestrante

Siendo la elección:

- Single drives.
- Familia de convertidor Sinamics, el G120
- Tipo de motor 1LA/1LG…
- Mechanical System

La familia de convertidores SINAMICS (G120) permite el control escalar de máquinas asíncronas y también el control vectorial de las mismas. Además, esta familia de convertidores permite insertar una resistencia de frenado en la etapa de c.c.

A la derecha de la selección del variador de velocidad, se puede elegir el Power Module, y aparece en este caso como predeterminado el PM240-2, que era el recomendado para el G120, como se indicaba en la Figura 4.4.3.

Al indicar Hoist Drive/Mechanics, el sistema toma como carga de la máquina eléctrica el sistema mecánico anteriormente definido.

Seguidamente, en la selección del motor, se tiene que indicar el uso de la reductora de velocidad. Es importante introducir el valor de reducción como cociente de la velocidad alta entre velocidad baja.

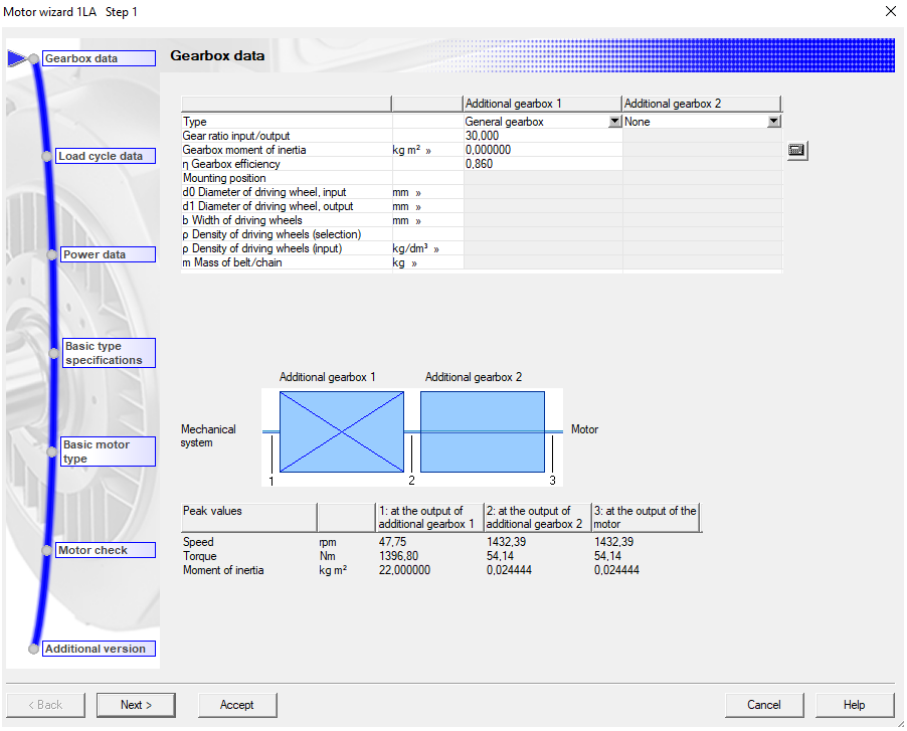


Figura 6.4 Reductor de velocidad del cabestrante

Ya en Basic Motor Type, para la selección del motor, entre todos los numerosos motores posibles a usar, aparece el motor que se eligió en el catálogo de forma manual (en (4)-4.3)) y que servía para la instalación. Al ser una opción válida, lo elegiremos.

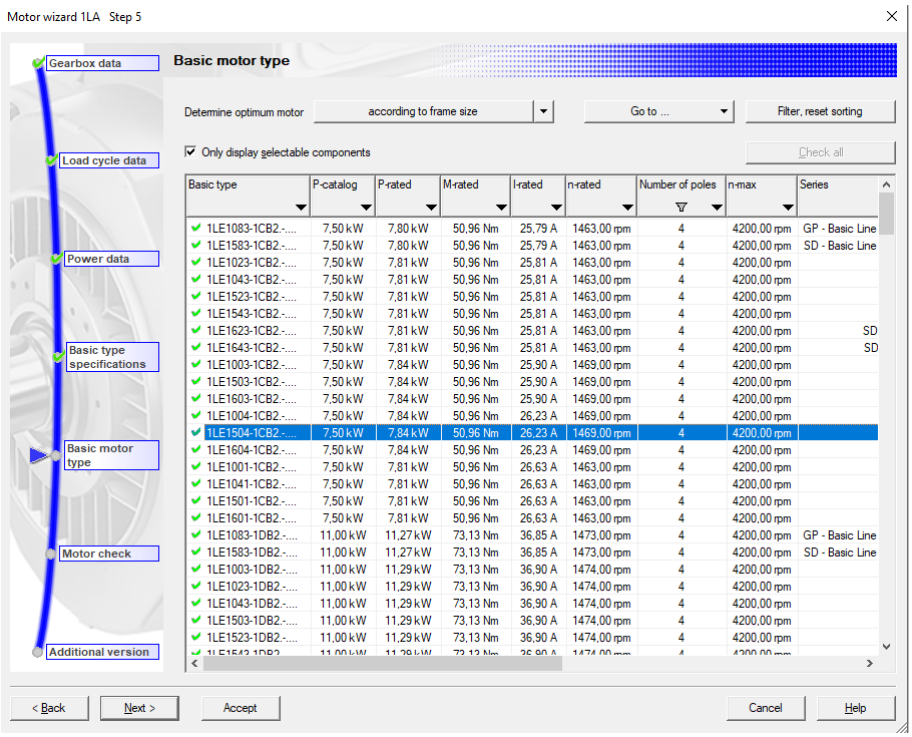


Figura 6.5 Motores recomendados para el cabestrante

En la siguiente ventana (Motor check) se muestran las curvas de par máximo con coeficiente de seguridad y par de plena carga y en el mismo plano se dibujan los puntos de carga máxima y el punto de par relevante al valor eficaz de la corriente. Al estar estos dos puntos críticos dentro del área delimitada por esas curvas, la zona de trabajo, se considera que el funcionamiento es satisfactorio. Además, aparece en la ventana un tic verde que confirma que es correcto.

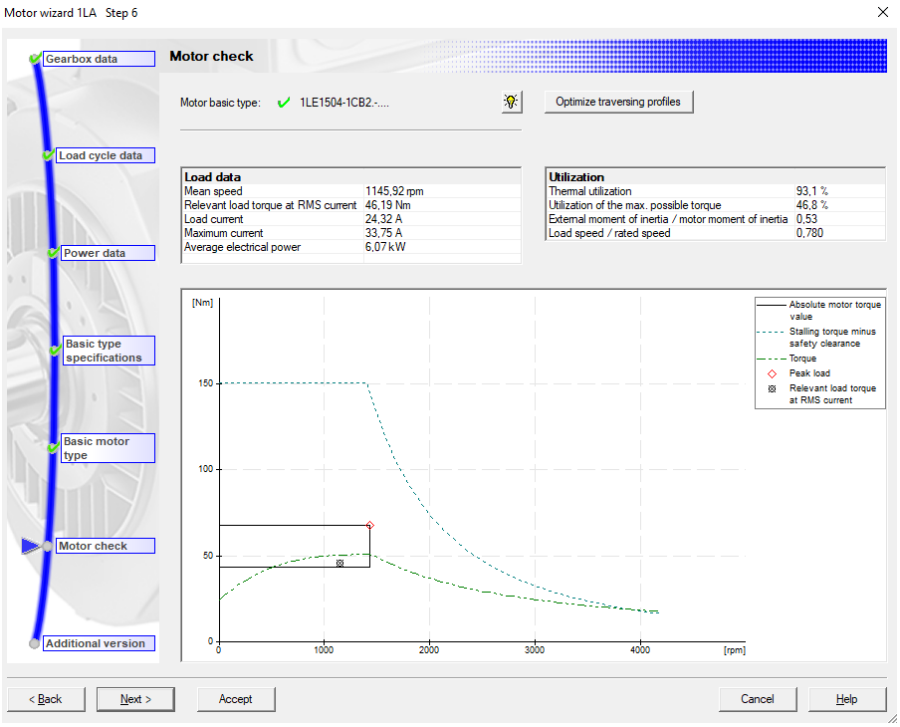


Figura 6.6 Motor check del cabestrante

Se puede decir que el dimensionado está correcto y el motor elegido sirve perfectamente. Los puntos críticos se encuentran dentro de la zona de trabajo del motor por lo que, de manera sencilla, el programa ha ayudado a seleccionar un motor compatible con la instalación electromecánica.

Aun teniendo ya el motor que se necesita, se procede con el dimensionado para obtener toda la hoja de pedidos, que será directamente enviada a Siemens.

Para la selección del Power Unit, se seleccionará el primero que el programa recomiende y sea apto:

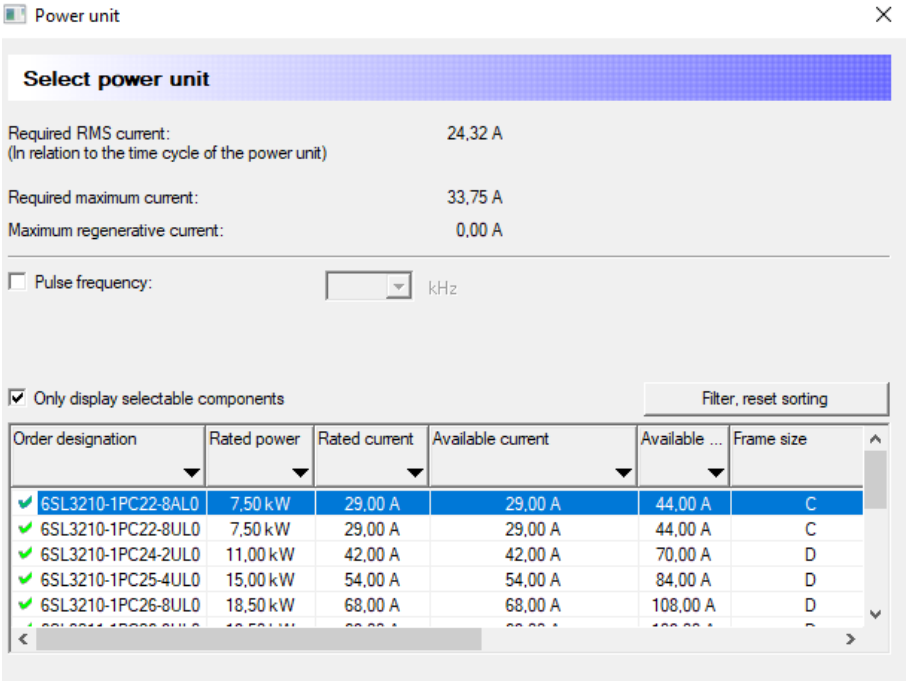


Figura 6.7 Power Unit del cabestrante

Además, en este dimensionado de Drive systems, se añadirá una resistencia de frenado (**Braking Resistor)** ya que, cuando el vehículo descienda por la rampa, la máquina eléctrica debe aplicar un par contrario a la velocidad de giro y así frenar. Ésta funciona como generador y toda esa energía eléctrica generada debe de ser consumida por el Braking Resistor, disipando así el elevado calor producido. También se seleccionará la opción del **Screening kit**, para así poder poner todo a una tierra común.

En Output Components, no se desea tener ningún output choke ni ningún encoder y solamente el cable de alimentación al motor se seleccionará de manera automática por el programa:

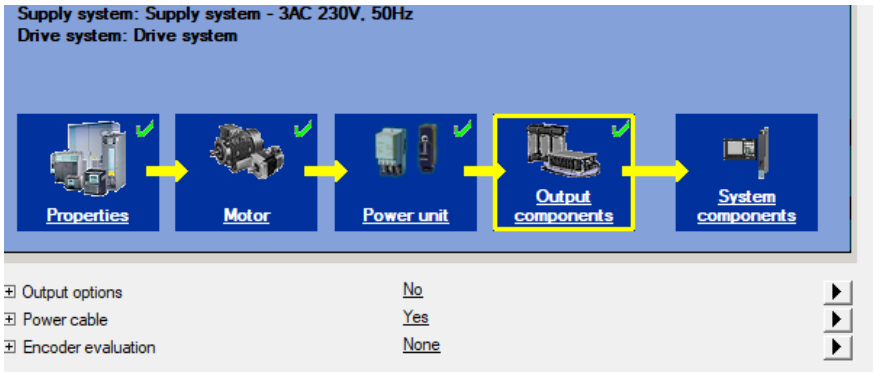


Figura 6.8 Output Components del cabestrante

Es innecesario configurar de manera rigurosa el Power cable ya que el motor estará cerca de toda la instalación. Es decir, que no se alimentará desde un sitio muy lejano, por lo que el cable que indica Sizer por defecto servirá perfectamente.

Para el dimensionado de los componentes del sistema, será apropiado instalar un disyuntor de corriente en la caja de mantenimiento, así como fusibles y bobina de ahogo para proteger el sistema, mientras que los Control Electronics serán elegidos automáticamente, aunque más adelante se especifiquen ciertos parámetros:

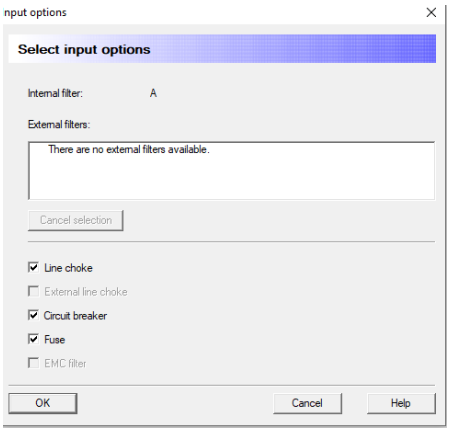


Figura 6.9 Input Options del cabestrante

A la hora de determinar el controlador, como se explicó en el Manual de Sizer, se puede acceder a la página de Siemens para que recomiende el más apropiado. En este caso, al tratarse de procesos sencillos y viendo anteriormente la Figura 4.4.3, para el variador G120, se recomendaba el controlador de la familia SIMATIC, por lo que el S7-1500 que aparece servirá.

Además, aparece por defecto el Power Module PM240-2, que es el recomendado para este variador y controlador:

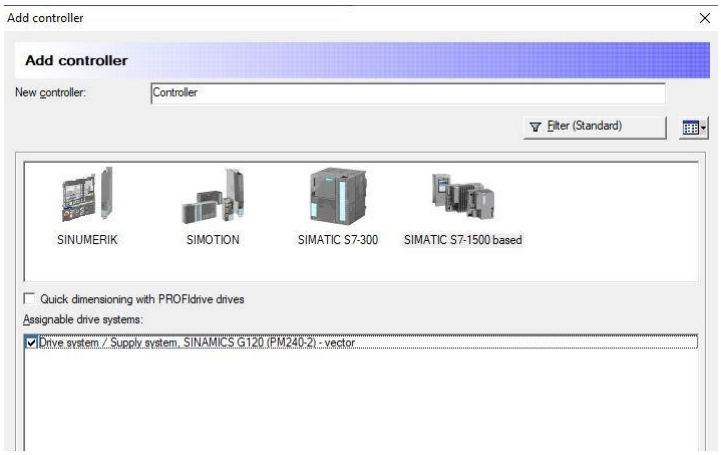


Figura 6.10 Controlador del cabestrante

Una vez seleccionado, se dimensionará en las propiedades de Open loop, una variante de control, con motion control unit, para que, de esta manera, se controle todo lo que el cabestrante moverá al vehículo.

Quedando:

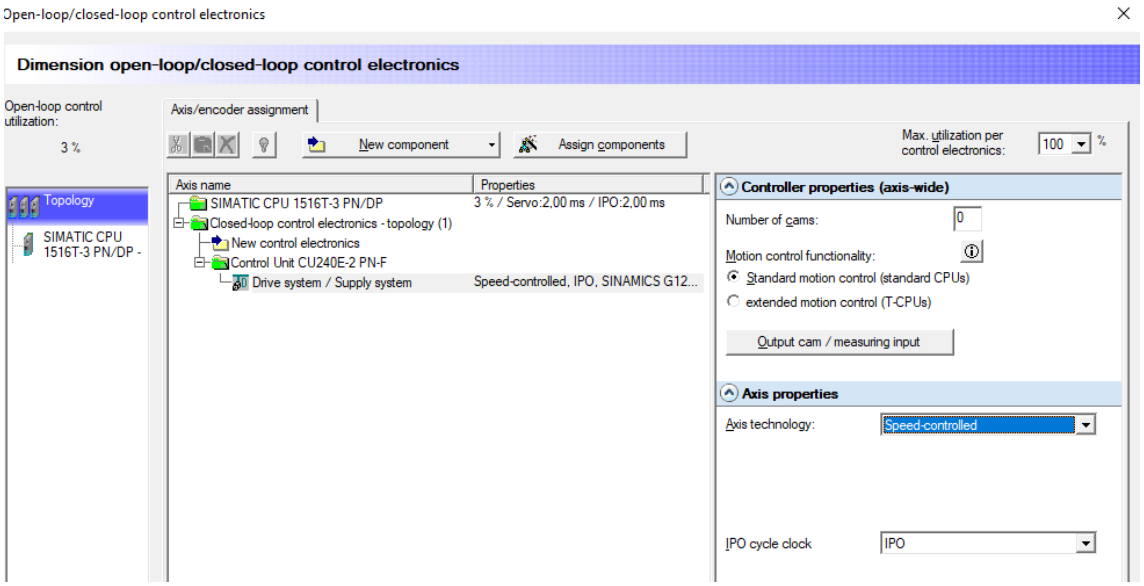


Figura 6.11 Control electronics del cabestrante

Y, por último, haciendo clic en Drive System/ Supply System, se indica que se desea un control de eje **por velocidad**.

Aceptando todas las demás opciones del sistema de control como selección automática, queda por finalizado el dimensionado de la instalación electromecánica.

Ya se puede acceder a Parts List y Technical Data para así poder tramitar el pedido a Siemens.

Quedando toda la instalación en:

Parts list

Pos.	Quantity	Order designation	Product
• Drive system / Supply system			
10	1	6SL3203-0CE23-8AA0	Line choke
20	1	3RV2031-4VA10	Circuit breaker
30	3	3NA3820	Fuse
40	1	6SL3244-0BB13-1FA0	CU; CU240E-2 PN-F
50	1	6SL3210-1PC22-8AL0	Power unit; PM240-2; 7,50 kW; 29,00 A; IE2
60	1	JJY:023433720001	Braking resistor; 0,38 kW; 7,50 kW
70	1	6SL3266-1EC00-0KA0	Screening kit
80	1	6FX5008-1BB51-1BA0	Motor supply cable; MOTION-CONNECT 500 without brake cable, by the meter (fixed mounting); 10,0 m
90	1	1LE1504-1CB22-2AA4	Induction motor (1LA/1LG/1PQ/1LE1); 7,84 kW; 230 V; Delta; 132 M; IM B3; Without flange

Figura 6.12 Parts List del cabestrante

7. Instalación y Conexionado

Para la correcta instalación de todo el sistema se ha recurrido a los manuales de instrucciones del variador G120 [17] y del Power Module [18] para seguir las pautas que indica Siemens.

Lo primero, para poder comprender todo el sistema, es tener una idea de los elementos presentes y cómo están distribuidos.

Desde un plano cenital, la disposición de todos los elementos es la siguiente:

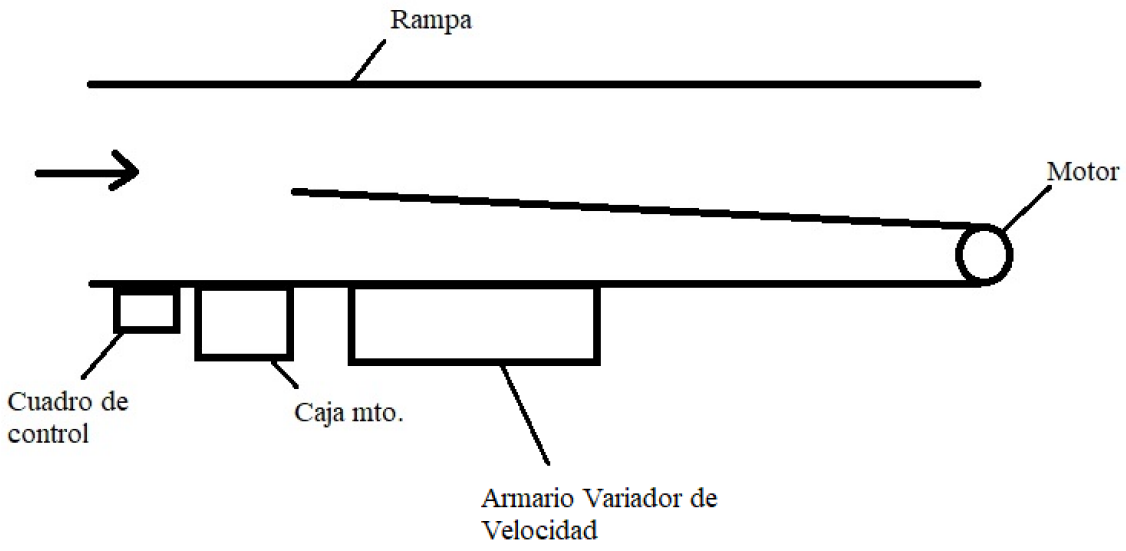


Figura 7.1 Disposición de la Instalación

Los elementos visibles externamente son:

- El motor
- El cuadro de control (caja de mandos)
- Armario Variador de Velocidad (Control Cabinet)
- Caja de mantenimiento (Cuadro de distribución)

Se alimentará a toda la instalación desde la caja de mantenimiento mediante conductores de cobre, y las conexiones de comunicaciones entre todos los elementos serán a través de PROFINET (Ethernet con terminaciones RJ-45).

Dentro del Control Cabinet, irá el variador de velocidad que se compone de:

- El Power Unit (PM240-2)
- El Control Unit (SIMATIC)
- El display Unit

La distancia de conexión entre los elementos de fuerza y los de control es mínima, evitando cualquier ruido/interferencia, como ocurre con el cableado largo.

El esquema simplificado del unifilar de la instalación es el siguiente:

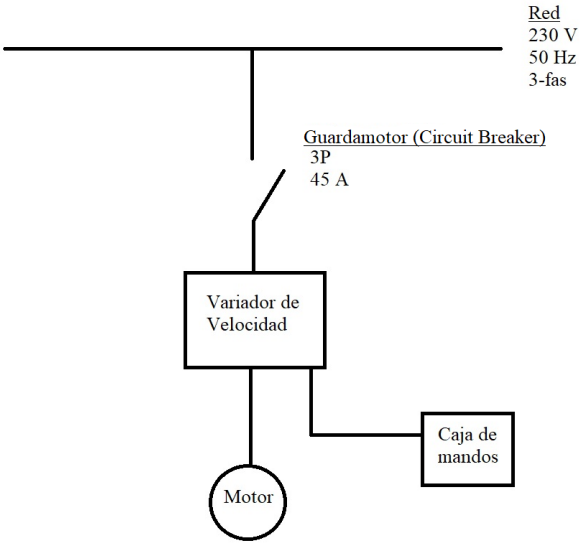


Figura 7.2 Unifilar

La protección necesaria aguas arriba de la instalación será un magnetotérmico, un contactor o un guardamotor para proteger al variador de velocidad de cortocircuitos. Tal como se indicó anteriormente, se utilizará el guardamotor especificado por Sizer.

Aguas abajo, el propio variador de velocidad se encargará de proteger todos los elementos y a las personas.

Se explicará el conexionado desde aguas arriba hasta abajo, empezando por la caja de mantenimiento o cuadro de distribución:

i. Cuadro de distribución (Caja de mantenimiento)

Dentro de este cuadro de distribución alimentado de la red (230 V, 50 Hz y 3-fas), irá instalado en las barras de cobre que hay dentro del cuadro el guardamotor de Siemens (3RV2031-4VA10).

Figura 7.3 Cuadro de distribución con guardamotor

El cuadro elegido es de la marca Schneider y deberá de tener espacio suficiente para el guardamotor, así como espacio adicional para futuras posibles conexiones de otras instalaciones. Es mejor separar todo esto del armario del variador de velocidad para así aislarlo de los posibles dispositivos futuros que se pueden conectar en el cuadro de distribución.

ii. Variador de velocidad

El variador de velocidad irá dentro de un Control Cabinet, un armario (Enclosure) de dimensiones medianas con espacio suficiente para el power unit y el control unit.

Figura 7.4 Variador de velocidad

Para realizar el conexionado de las protecciones del power module se realizará, tal y como se indica en el manual de uso, utilizando los elementos recomendados por Sizer (fusibles y el line choke (line reactor)).

Siempre se ha de separar la parte de fuerza de la de control, pero debido a que la base portafusibles aísla de por sí y de que el filtro de linea ha de ir acoplado al Power Module, se introducirá todo en el Control Cabinet. La conexión será la siguiente:

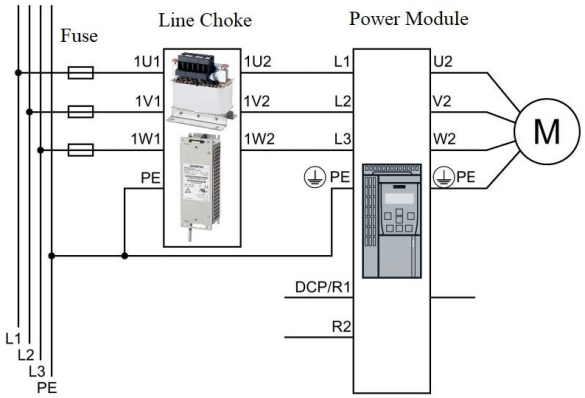


Figura 7.5 Cableado en el Control Cabinet

El cable entrante al Control Cabinet irá a una base portafusibles del tamaño apropiado para los fusibles especificados por Sizer. La caja está diseñada para que estén aislados y para la extracción de los tres fusibles de manera simultánea.

Figura 7.6 Base Portafusibles

Los cables salientes del portafusibles irán al filtro de linea el cual, según el manual, irá acoplado al Control Cabinet y justo en el mismo filtro irá el power module de la siguiente manera:

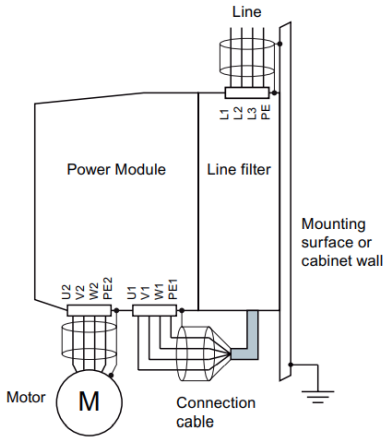


Figura 7.7 Conexión del Power Module

El Screening Kit está diseñado para la correcta puesta a tierra de todos los cables entrantes y salientes al variador. Este kit va atornillado directamente al Power Module.

Una vez instalado el Power module en el armario, se le añadirán los elementos acoplables directamente. Estos elementos son el Control Unit, Braking resistor, y el display unit.

Según el manual de uso, para el Control Unit y el Braking Resistor:

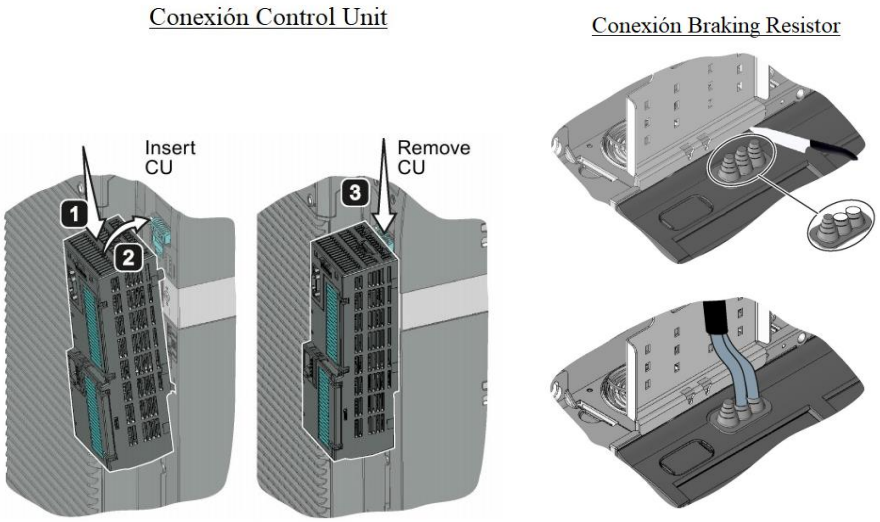


Figura 7.8 Conexiones Control Unit y Braking Resistor

Las conexiónes electricas entre el control unit y el power module se establecen directamente al acoplarse encima.

Para el display unit, sería posible operar el variador de velocidad directamente desde la puerta, sin necesidad de abrirla. Para ello se puede adquirir una puerta del control cabinet con el Operator Panel acoplado a ella. Esto no es necesario en nuestra instalación ya que habrá un cuadro de mandos paralelo para la facil interacción de los operarios, aunque la velocidad se programará desde este display:

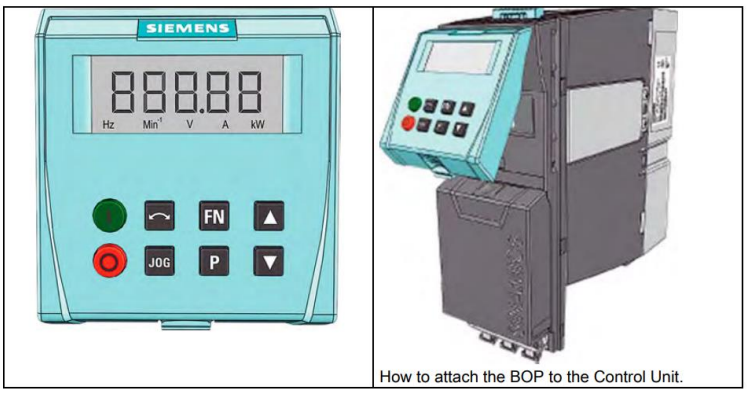


Figura 7.9 Conexión Operator Panel

iii. Motor

La conexión del motor es directa al variador de velocidad. Existen unos bornes en el power module directamente para la conexión del motor:

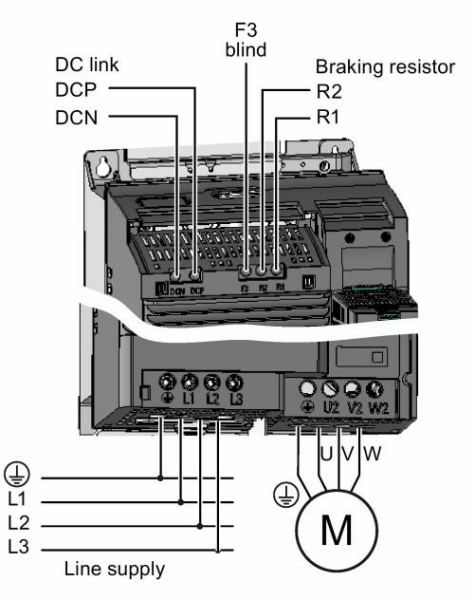


Figura 7.10 Ubicación de las bornas de conexión del motor

iv. Cuadro de mandos

Para simplificar la labor de los operarios que subirán y bajarán los vehículos por la rampa, se instalará una caja de mandos con botones de subir, bajar y stop, así como una seta de emergencia por motivos de seguridad.

Figura 7.11 Ejemplo de botonera/ Caja de mandos

Schneider permite personalizar la botonera con los botones necesarios para cada instalación

La conexión de este mando irá justo a los inputs analógicos de variador de velocidad, pero la selección de la velocidad y rampas de arranque y frenado deberán de ser prefijadas mediante el display unit al configurar el variador.

8. Presupuesto

Para poder calcular el presupuesto total, se numerarán los elementos que se han ido mencionando en el anterior apartado junto a su precio y, además, se tendrá en cuenta la mano de obra de instalación.

El precio de los elementos se puede encontrar en páginas web y mediante la comprobación de precios de elementos equivalentes a los elegidos de otras marcas:

- 1 Ud. de suministro y montaje de cuadro metálico con barras de cobre de la marca Schneider con suficiente espacio para el guardamotor y con espacio adicional para futuras instalaciones –(114,53 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Circuit Breaker guardamotor Siemens (3RV2021-4EA10) –(182,06 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Armario metálico Control Cabinet de la marca Schneider, con suficiente espacio para todos los elementos que componen el variador de velocidad y espacio adicional suficiente –(526 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Base portafusibles Siemens (Tamaño NH000) –(52 €).

- 3 Ud. de suministro y montaje de Fusibles Siemens (3NA3820) –(18,16 € la ud.).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Braking Resistor (6SL3201-0BE21-8AA0) –(30 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Line choke (input) de Siemens (6SL3203-0CE23-8AA0) –(115,15 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Screening Kit de Siemens (6SL3266-1EC00-0KA0) –(55,86 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Power Unit Siemens PM240-2 (6SL3210-1PC22-8AL0) –(716,38 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Controlador SIMATIC S7-1500 based (6SL3244-0BB13-1FA0) –(257,73 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Operator Panel BOP de Siemens (6SL3255-0AA00-4CA1) –(47,90 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de Motor de Inducción Siemens (1LE1504-1CB22-2AA4) –(1.220 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de soporte de fijación para el motor –(100 €).

- 1 Ud. de suministro y montaje de caja de pulsadores (estación de control 4 aperturas), control remoto, con:
  a) 1 Ud. interrupto-caja, selector modular -(35 €)
  b) 1 Ud. Pulsador "flecha abajo" 22mm serie Harmony XB4 –(9.61 €)
  c) 1 Ud. Pulsador "flecha arriba" 22mm serie Harmony XB4 –(9.61 €)
  d) 1 Ud. Pulsador + piloto luminoso LED Rojo 22mm serie Harmony XB4 –(17€)
  e) 1 Ud. Pulsador Seta, parada de emergencia, disparo giratoria –(38 €)

- 10 mts. de suministro y montaje de conductor de cobre 4x10 mm^2 RV-K, 4 kV– (96 € los 10 mts.).

- 10 mts. de suministro y montaje de tubo corrugado para todos los cables salientes de los armarios –(20 €).

- Suministro y montaje de pequeño material de montaje (manguitos, terminales, pequeños tramos de flexo…) –(30 €).

Un total de 3.727,31 €, añadiendo el IVA: 4.100 €

Con el coste de los operarios en el montaje propio (3.000 €), añadiendo unos costes indirectos del 10%: 7.810,04 €

Y, por último, para la realización de este proyecto que ha requerido tanto horas de trabajo de becario (a 5 €/h, en los 4 meses de cuatrimestre) como horas de trabajo de supervisor (a 15 €/h, en los 4 meses de cuatrimestre), se añadirá una cantidad de 2.000 €.

En total, el presupuesto inicial sería de unos 9.810,04 €.

9. Resumen y Conclusiones

9.1. Resumen

En este TFG se ha ido desarrollando el proyecto de un cabestrante para vehículos explicando todo lo necesario, tanto para su dimensionado como para la comprensión completa del proyecto. Para haber logrado elegir satisfactoriamente todos los elementos necesarios para poder llevar a cabo la instalación, se han realizado una serie de cálculos contemplando las distintas situaciones que se pueden plantear y se ha escrito un manual de uso de un programa informático de dimensionado. En el presente proyecto se pueden diferenciar 5 partes esenciales.

En la primera parte del proyecto se explica detenidamente toda la teoría en relación con el cabestrante. Para no ir directamente al cálculo de los diferentes términos necesarios para la selección del motor, es necesario explicar todos los factores a considerar en las decisiones de selección. Se explican todos los términos y ecuaciones, así como los conceptos más básicos para que pueda ser comprendido de manera sencilla. Estos son:

- Accionamientos
- Par Motor
- Momento de Inercia
- Cajas de engranajes
- Velocidad Angular
- Fuerzas de Resistencia en un vehículo

Una vez toda la teoría queda explicada, se procede a la segunda parte del proyecto. Aquí se realizan los cálculos para la determinación del par motor y de la potencia necesaria para, más adelante, elegir el motor más adecuado. Esto se consigue mediante el planteamiento de las distintas situaciones que los vehículos tendrán una vez esté la instalación terminada. Estas situaciones son:

- Avance a velocidad constante ascendiendo por la rampa.
- Arranque desde el reposo ascendiendo por la rampa hasta lograr determinada velocidad en un tiempo indicado.
- Descenso del vehículo por la rampa a velocidad constante evitando que se embale.
- Arranque desde el reposo descendiendo por la rampa hasta lograr determinada velocidad en un tiempo indicado.

Además, se tiene en consideración cómo se frenará al vehículo, explicando las distintas maneras posibles de hacerlo y calculando los pares de freno que el motor deberá de realizar para así hallar la sobrecarga a la que estará sometido.

Para la fácil comprobación de los resultados se desarrolló además un libro Excel en el cual, mediante la introducción de datos iniciales, se muestran los resultados de forma clara y automática.

Ya, con los cálculos de todos los supuestos realizados, se pasa a la tercera parte del proyecto, donde se explica en detalle todo lo que debemos conocer del motor y de los accionamientos, desarrollando la clasificación del motor según la clase de servicio, se

calcula la velocidad nominal del motor y la manera manual de elegirlo mediante el uso del catálogo, así como la selección del variador de velocidad que se usará.

Debido a lo tedioso que resultan todos los cálculos y el proceso de dimensionar la instalación, en este TFG se implementa la manera sencilla y gratuita de hacerlo, que es mediante el uso del software de Siemens llamado Sizer.

En la cuarta parte del proyecto, se ha desarrollado un manual de uso de este programa de manera sistemática, para que cualquier persona pueda usarlo y dimensionar cualquier instalación. Este manual es independiente del cabestrante. Es un manual de uso general que explica los pasos a seguir para lograr el correcto dimensionado de un accionamiento.

Una vez se ha comprendido cómo se ha de utilizar el programa Sizer y de todos los factores que se tienen en cuenta para la instalación del cabestrante, se procede al último bloque, el dimensionado del cabestrante mediante Sizer, la explicación de cómo se instalarán todos los elementos de manera desarrollada y la solicitud de la oferta para realizar la instalación con un presupuesto estimado.

9.2. Conclusiones

Con el dimensionado del cabestrante, tanto de manera manual como de manera automática con software, se puede apreciar claramente la importancia del sobredimensionado de todo tipo de instalaciones. Existen numerosos factores que influirán en los procesos rutinarios y en el mundo práctico no se puede calcular todo con la precisión de la física. Es por ello por lo que el resultado final de la instalación no puede quedar acorde a los cálculos teóricos. Debe de haber un porcentaje de error.

Otra apreciación del presente TFG es referente a la fuerza resistiva del vehículo. Esta fuerza es de suma importancia para el cálculo del motor necesario, siendo los componentes de resistencia a la rodadura y el componente del peso del vehículo los que más influyen en el cálculo. Para velocidades tan bajas como a las que habrá al subir o bajar vehículos de la rampa, la fuerza de resistencia aerodinámica **es prácticamente despreciable**.

La manera de realizar toda la instalación, así como el conexionado es muy importante y ayudará a comprender mejor tanto el funcionamiento de la instalación, como la manera de interacción entre los equipos. Es por ello por lo que se han explicado detalladamente los pasos a seguir para conseguir una instalación satisfactoria.

A mi manera de ver, gracias a Siemens, con su Software completamente gratuito, se puede diseñar una instalación tanto para aplicaciones simples como para industrias a gran escala, y es mediante estas simulaciones con las que una empresa puede ahorrar gran cantidad de dinero a la hora de realizar nuevas instalaciones. Si se está analizando la viabilidad del proyecto, no hay mejor manera de estimar un presupuesto que con un programa que indica todos los componentes necesarios para su desarrollo. De esta forma, todos los usuarios pueden ahorrar gran cantidad de dinero.

10. Bibliografía

[1] Creada a partir de Online Charts. [En línea]. Available:

https://www.onlinecharttool.com/graph

[2] DGT, Gestión Técnica de tráfico. [En línea]. Available:

http://www.dgt.es/Galerias/la-dgt/empleo-publico/oposiciones/doc/2013/TEMA_4_GESTION_TECNICA_TRAFICO.doc

[3] Máquinas Eléctricas (Javier Sanz Feito, 2002, Pearson Education, España)

[4]Frenado de máquinas asíncronas -Imagen Cuadrantes de Funcionamiento y Frenado Regenerativo. [En línea]. Available:

https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Frenado%20asincronas_Web.pdf

[5] Guía del frenado eléctrico, ABB. [En línea]. Available:

https://library.e.abb.com/public/92546f2be5281d93c1256d280041534a/Technical_Guide_No_8_ES.pdf

[6] Guía del motor, ABB Motors-Clases de servicio. [En línea]. Available:

http://kimerius.com/app/download/5783168850/Informaci%C3%B3n+t%C3%A9cnica+b%C3%A1sica+de+motores+de+inducci%C3%B3n+de+baja+tensi%C3%B3n.pdf

[7] Low voltage motor guide, IEC explanation. [En línea]. Available:

https://new.abb.com/docs/librariesprovider53/about-downloads/low-voltage-motor-guide.pdf

[8] Technical information VDE 0530 regulations. [En línea]. Available:

https://www.teausa.net/Portals/0/uploads/TEA-Neckar-Fine-Precision-Motors-and-Gearboxes-Technical.pdf

[9] Catálogo de motores de Siemens- Simotics GP, SD, XP, DP Low Voltage Motors. [En línea]. Available:

https://cache.industry.siemens.com/dl/files/197/109749197/att_955119/v1/simotics-gp-sd-xp-dp-catalogue-d-81-1-en-2018.pdf

[10] Catálogo Variadores de Velocidad Siemens [En línea]. Available:

https://www.industry.siemens.com/home/aan/es/ecuador/Documents/Cap1.%20Variadores%20Siemens.pdf

[11] Principles of adjustable frequency drives [En línea]. Available:

http://vfdriveinfo.com/vfd-training-slides/07-afdrives.pdf

[12] Variador de Velocidad Siemens V20 [En línea]. Available:

https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ee923f5d-d01c-4533-aa56-39a610d049c8/width:3840/quality:high/version:1560777616/p-d011-xx-00778p-originalvar.png

[13] Selección del Variador de Velocidad. [En línea]. Available:

https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:d1e8cc44-a4e2-46d4-aa68-ff08f2c44a8f/version:1570453761/dfmc-b10032-00brsinamicsenus-72.pdf#page=16

[14] Drivers de Siemens. [En línea]. Available:

https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics.html

[15] Sinamics G120 variador de frecuencia modular. [En línea]. Available:

http://www.flamoil.es/descargas/Siemens_VariadoresDeVelocidad.pdf

[16] Selector de PLC´s Siemens. [En línea]. Available:

https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc.html#Featuresandfunctions

[17] SINAMICS G120 User Manual. [En línea]. Available:

https://inverterdrive.com/file/Siemens-CU240-Control-Units-Manual

[18] SINAMICS G120 Control Units Operating Instructions. [En línea]. Available:

https://media.distributordatasolutions.com/seimens/2016q3/8172bf5842f488325808b111263dd46efe7f0fe1.pdf